

Aprovechamiento energético del metano en el tratamiento de aguas residuales

Casos de estudio en
El Salvador, México y Panamá

Silvia Saravia Matus
Diego Fernández
Pedro Chavarro
Alfredo Montañez
Natalia Sarmanto



NACIONES UNIDAS

CEPAL

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

Deseo registrarme



NACIONES UNIDAS



www.cepal.org/es/publications



www.instagram.com/publicacionesdelacepal



www.facebook.com/publicacionesdelacepal



www.issuu.com/publicacionescepal/stacks



www.cepal.org/es/publicaciones/apps

SERIE

RECURSOS NATURALES Y DESARROLLO

226

Aprovechamiento energético del metano en el tratamiento de aguas residuales

Casos de estudio en
El Salvador, México y Panamá

Silvia Saravia Matus
Diego Fernández
Pedro Chavarro
Alfredo Montañez
Natalia Sarmanto



NACIONES UNIDAS

CEPAL

Este documento fue preparado por Silvia Saravia Matus, Oficial de Asuntos Económicos de la División de Recursos Naturales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), y Diego Fernández, Pedro Chavarro, Alfredo Montañez y Natalia Sarmanto, Consultores de la misma División.

La elaboración del documento fue posible gracias al financiamiento del proyecto "Potable water, sanitation and renewable energies to improve the health conditions of the population and promote productive uses in the most lagging behind municipalities of the countries of the northern subregion of Latin America and the Caribbean" (PDF-SDG-2021-07), liderado por la CEPAL y financiado por el subfondo para la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible del fondo fiduciario de las Naciones Unidas para la paz y el desarrollo.

Las Naciones Unidas y los países que representan no son responsables por el contenido de vínculos a sitios web externos incluidos en esta publicación.

No deberá entenderse que existe adhesión de las Naciones Unidas o los países que representan a empresas, productos o servicios comerciales mencionados en esta publicación.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representa.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas de esta publicación no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Publicación de las Naciones Unidas
ISSN: 2664—4541 (versión electrónica)
ISSN: 2664—4525 (versión impresa)
LC/TS.2024/143
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2024
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.2401071[S]

Esta publicación debe citarse como: S. Saravia Matus y otros, "Aprovechamiento energético del metano en el tratamiento de aguas residuales: casos de estudio en El Salvador, México y Panamá", *serie Recursos Naturales y Desarrollo*, N°226 (LC/TS.2024/143), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2024.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Agradecimientos especiales

México: Beatriz Cabrera Gómez, Jefa de Proyecto de Potabilización y Desaladoras, de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); Mónica Camarena García, Jefe de Proyecto en la Gerencia de Cooperación Internacional de CONAGUA; Pamela Alejandra Rojas Hernández, Subgerente de Cooperación Multilateral de CONAGUA; Rubén Darío Tovar Díaz, Director General de Operaciones y Atención a Emergencias de la Comisión de Agua del Estado de México (CAEM); Elvia Mateo Martínez, Subdirectora de Tratamiento de Aguas Residuales de CAEM; Erika Ramírez Méndez, Directora Local de CONAGUA - Quintana Roo; Alberto Covarrubias Cortés, Director General de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Quintana Roo (CAPA), y Ricardo Alfonso Sánchez Rivera, de CAPA.

El Salvador: Jorge Castañeda, Presidente de la Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA); Rubén Alemán, Presidente de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA); Karla de Palma, Directora General de la Agencia de El Salvador para la Cooperación Internacional (ESCO); Willian DeLeón, Director de la Unidad Ambiental de la Cancillería de El Salvador; Carlos Flores Chavarría, Asesor de Presidencia (ASA); Miriam Vides, Subdirectora de Planificación y Cooperación (ASA); Raúl López, Director Técnico (ASA); Israel Flores, Director Técnico (ANDA); Eduardo Choto, Jefe de Eficiencia Energética (ANDA); Claudia Ramírez, Gerente de Planificación (ANDA); Débora Juárez, Gerente de Saneamiento (ANDA), y Otho Argueta, Coordinador de Unidad Ejecutora de Proyectos BID– ANDA.

Panamá: Guillermo Antonio Torres Díaz, Secretario Técnico del Consejo Nacional del Agua; Mayela Guiteria Cortez, coordinadora y enlace de seguimiento a proyectos del Agua y Sanamiento del Ministerio de la Presidencia; Rafel Reyes, Director de Planificación del Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales de Panamá (IDAAN); Karina Batista, Dirección de Planificación, Sección de Planificación física y Asistencia Técnica (IDAAN), y Gloria Trejos, Autoridad del Canal de Panamá.

Índice

Resumen	7
Introducción	9
I. Aprovechamiento de metano y cogeneración de energía eléctrica: Un enfoque de economía circular en el tratamiento de aguas residuales	11
II. Viabilidad económica, ambiental y social del aprovechamiento de metano en PTAR con capacidades menores a 500 l/s: Casos de estudio en El Salvador, México y Panamá	15
A. Metodología empleada en la estimación de emisiones de metano en el tratamiento de aguas residuales	16
B. Potencial del aprovechamiento energético del metano en PTAR seleccionadas en El Salvador, México y Panamá	17
1. Caracterización general de las PTAR.....	17
2. Metano emitido y aprovechable en la generación de energía eléctrica.....	23
3. Estimación de los costos de inversión	27
4. Beneficios económicos del aprovechamiento del metano.....	31
5. Beneficios ambientales del aprovechamiento del metano	34
III. Conclusiones	39
Bibliografía	43
Anexos	47
Anexo A1.....	48
Anexo A2	50
Anexo A3.....	51
Serie Recursos Naturales y Desarrollo: números publicados	53

Cuadros

Cuadro 1	Características generales de las PTAR en estudio	18
Cuadro 2	Metano potencialmente emisible y captable en cada fase de tratamiento de las PTAR analizadas	23
Cuadro 4	Costos de inversión estimados para el aprovechamiento energético del metano en PTAR seleccionadas de El Salvador	27
Cuadro 5	Costos de inversión estimados para el aprovechamiento energético del metano en PTAR seleccionadas de México	28
Cuadro 6	Costos de inversión estimados para el aprovechamiento energético del metano en PTAR seleccionadas de Panamá	28
Cuadro 7	Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica en las 10 PTAR seleccionadas.....	31
Cuadro 8	Potencial energético de las PTAR analizadas en México utilizando el 80% de su capacidad instalada	32
Cuadro 9	Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica en PTAR de México suponiendo un uso del 80% de la capacidad instalada	33
Cuadro 10	Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica suponiendo un uso del 80% de la capacidad instalada en la PTAR Puerto Armuelles	34
Cuadro 11	Reducción de emisiones en las 10 PTAR de estudio	35

Gráficos

Gráfico 1	Resultados de estimación de metano recuperable en las 10 PTAR analizadas.....	27
Gráfico 2	Resultados de estimación de energía eléctrica generable en las 10 PTAR analizadas	27
Gráfico 3	Costo de inversión por cada MWh/año de energía eléctrica generable en las 10 PTAR seleccionadas	30
Gráfico 4	Costo de inversión por cada litro de capacidad instalada de las 10 PTAR seleccionadas	30

Recuadro

Recuadro 1	Aspectos operacionales de las PTAR analizadas	21
------------	---	----

Diagramas

Diagrama 1	Esquema de procesos de tratamiento y manejo de lodos en PTAR de estudio de tipo anaerobio	19
Diagrama 2	Esquema de procesos de tratamiento y manejo de lodos en plantas de tipo aerobio – PTAR Centenario	19
Diagrama 3	Procesos de tratamiento y manejo de lodos en Plantas Bicentenario y San Miguelito	20

Mapa

Mapa 1	Localización general de las PTAR en estudio	17
--------	---	----

Resumen

En el mundo existe abundante evidencia de los beneficios derivados de integrar la economía circular en los sistemas de agua potable y tratamiento de aguas residuales, permitiendo el aprovechamiento de subproductos como agua, nutrientes, biosólidos y energía. A pesar de los retornos ambientales y sociales, estos enfoques no siempre resultan rentables para los entes encargados del saneamiento.

Muchos estudios en la región han demostrado la viabilidad financiera de recuperar metano y generar energía en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) con capacidades superiores a 500 litros por segundo (l/s) (Saravia Matus y otros 2022a). Sin embargo, se ha prestado escasa atención a las PTAR de menor capacidad. Dado que este tipo de sistemas son típicos en la región. El presente estudio analizará la viabilidad financiera y los beneficios socioeconómicos y ambientales del aprovechamiento del metano en cogeneración en diez plantas de tratamiento de aguas residuales con capacidades inferiores a 500 l/s ubicadas en municipios seleccionados de El Salvador, México y Panamá.

Los resultados consolidados de los tres países revelan que, para aprovechar eficientemente el metano en las plantas analizadas en El Salvador, México y Panamá, se requiere una inversión de 6,82 millones (de dólares estadounidenses). Esta inversión permitiría generar 8.846 MWh/año de energía eléctrica, con ahorros anuales de 1,52 millones de dólares. Estos montos de ahorro permitirían recuperar la inversión en un plazo promedio de 6,5 años, además de reducir las emisiones de CO₂ equivalente en 5.425 toneladas anuales. Lo anterior equivale a reducir las emisiones asociadas al consumo anual de 2 mil metros cúbicos de diésel y correspondería a las emisiones per cápita de 3.390 habitantes de América Latina y el Caribe¹.

Estos resultados, sugieren la conveniencia de desarrollar proyectos en la región orientados al aprovechamiento del metano en las PTAR. En consecuencia, el presente documento identifica recomendaciones para replicar y ampliar el análisis del potencial de metano en PTAR de mediana y pequeña capacidad; Además, propone estrategias para impulsar opciones de financiamiento climático. Para ello, es fundamental considerar como criterio central la postulación de proyectos con la generación del mayor impacto posible en términos de reducción de emisiones, así como el potencial de obtener consecuentes beneficios económicos, sociales y de salud.

¹ Estimado a partir de las emisiones per cápita documentadas por el Banco Mundial para Colombia en el 2020: de 1,6 Ton/año.

También se resalta la necesidad de fortalecer las capacidades técnicas, operativas, políticas y prospectivas de las instituciones que operan en el sector de agua y saneamiento. En consecuencia, el desafío presente es potenciar a un sector con cada vez mayores capacidades institucionales, para implementar no solo la gestión circular del agua en la región, sino también saber enfrentar los desafíos de los procesos de innovación presente, impulsados por la inteligencia artificial y las soluciones basadas en *big data*, cuestiones que, entre otras, permitirán potenciar actividades y proyectos que contribuyen derechamente al cumplimiento del ODS 6.

Introducción

La aplicación de materias de economía circular en la gestión de los recursos hídricos es fundamental para garantizar el acceso a servicios de agua y saneamiento de calidad. En el caso del aprovechamiento energético del metano, es importante establecer, mientras se reduce el impacto ambiental de la operación, se incrementa la eficiencia técnica y financiera. La introducción de este enfoque brinda soluciones a múltiples problemáticas; consecuentemente permite la configuración de un ciclo virtuoso en términos económicos, ambientales y sociales.

Según el Banco Mundial (Banco Mundial, 2023) la reducción o abatimiento de la curva del metano es la estrategia más rápida y rentable para mantener al alcance el objetivo de limitar el calentamiento global a 1,5°C; al mismo tiempo, apoya los medios de vida de miles de millones de personas. Se estima que el 20% de las emisiones globales de metano son causadas por la descomposición anaeróbica de alimentos y otros materiales orgánicos presentes en rellenos sanitarios, botaderos a cielo abierto y manejo de aguas residuales (Climate & Clear Air Coalition- UNEP, 2021). Para hacer frente a los desafíos climáticos y de desarrollo que presentan las emisiones de metano, el Banco Mundial señala el rol clave del sector residuos, con la meta a reducir las emisiones de metano para 2030 en al menos un 35 % por debajo de los niveles de 2020 y casi en 55% para 2050, todo ello acoplado a los objetivos del Acuerdo de París (2016). En este sentido se destaca que entre las medidas recomendadas por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA-UNEP) para la reducción de metano en el sector de agua y saneamiento, se encuentra la actualización o mejoramiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales, que incluyan el tratamiento anaeróbico secundario/terciario con recuperación y utilización de biogás (Climate & Clear Air Coalition-UNEP, 2021).

Con estos antecedentes, el aprovechamiento energético del metano se ha convertido en una alternativa valorada y aplicada en diferentes países de la región. Según el estudio realizado por Saravia Matus y otros (2022a), se estima que en 75 PTAR ubicadas en Bolivia, Colombia, Costa Rica, México y Perú, con capacidades que oscilan entre 500 y 4.000 litros por segundo, se podrían capturar anualmente 103 millones de metros cúbicos de metano. A partir de ello, se podrían generar 360.725 MWh/año de energía, lo que equivale al consumo anual de electricidad de más de 200.000 habitantes, así como 412.000 MWh/año de energía calórica, aproximadamente.

En consecuencia, el presente documento busca identificar y analizar oportunidades equivalentes en la gestión de los sistemas de saneamiento de pequeña escala, existentes en municipios de El Salvador, México y Panamá, analizando específicamente en PTAR con capacidades de tratamiento que oscilan entre 50 l/s y 500 l/s. Para llevar a cabo este análisis, se seleccionó una muestra compuesta por diez PTAR, a saber: San Juan Opico, Ciudad Futura y Metapán en El Salvador; San Martín de las Pirámides, Centenario, Bicentenario y San Miguelito en México; y Montijo, Puerto Armuelles y Soná en Panamá. La selección de estas instalaciones se fundamentó en criterios que abarcan la oportunidad, replicabilidad e interés local en el desarrollo del análisis.

Primeramente, se estudiaron los múltiples beneficios que derivan de una gestión circular de las aguas residuales. A continuación, se estimó el potencial de metano emisible, tomando en cuenta las diferencias de tecnología, carga orgánica y nivel de utilización de la capacidad instalada de cada PTAR, utilizando la metodología propuesta por Saravia Matus y otros (2022a) que se basa en el IPCC (2006) e IPCC (2019). Después se calcularon los costos de inversión necesarios para el aprovechamiento de este metano en la generación de energía eléctrica, seguido de la estimación de los beneficios económicos que el proyecto generaría. Con estos datos, se realizó una evaluación de la viabilidad financiera del aprovechamiento del metano en cada una de las PTAR con un horizonte de evaluación de 20 años. También se analizó el efecto en la reducción de emisiones de CO₂ equivalente para cada PTAR. Finalmente, se elaboraron las conclusiones del ejercicio, así como las recomendaciones para replicar y escalar estos procedimientos en los países de la región.

Las estimaciones de generación de metano y las inversiones asociadas con su potencial aprovechamiento, que se presentan en este documento, fueron preparadas inicialmente CEPAL con base en información suministrada por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados de El Salvador (ANDA), la Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA), la Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA) la Comisión de Agua Potable del Estado de México (CAEM), la Comisión de Agua Potable de Quintana Roo (CAPA), el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales de Panamá (IDAAN) y el Ministerio de la Presidencia (Consejo Nacional del Agua de Panamá). Estas estimaciones fueron validadas en talleres de capacitación organizados por la CEPAL en julio de 2023 en Quintana Roo (México), en septiembre de 2023 en San Salvador (El Salvador) y en marzo de 2024 en la Ciudad de Panamá (Panamá), con la debida coordinación con las entidades mencionadas. Los talleres de capacitación contaron con cerca de 100 participantes, incluyendo representantes de entidades nacionales y locales responsables en cada uno de los países del sector de agua y saneamiento, así como personal técnico a cargo de la operación de las PTAR objeto de este estudio. Consecuentemente, las encuestas de evaluación de los talleres mostraron altos niveles de satisfacción e interés en impulsar inversiones en esta temática y sector.

Es importante destacar que en la realización del ejercicio que se presenta a continuación se evidencian algunas limitaciones relacionadas con las estimaciones del nivel de emisiones de metano de las PTAR en su estado actual, por lo tanto, se utilizaron supuestos para la estimación de la reducción de emisiones asociadas a la implementación del aprovechamiento de metano en cada una de ellas. Estos supuestos fueron verificados y construidos con las contrapartes nacionales.

I. Aprovechamiento de metano y cogeneración de energía eléctrica: un enfoque de economía circular en el tratamiento de aguas residuales

La economía circular para la CEPAL es un modelo de transformación productiva que busca optimizar el uso de los recursos disponibles, innovar en los procesos y desarrollar nuevos modelos de negocio que aporten en las dimensiones: ambiental (reduciendo presión sobre los recursos naturales con menos emisiones y contaminación), económica (nuevas actividades, mejorando las cadenas productivas con mayor eficiencia y eficiencia) y social (empleos verdes con mayor calidad de vida). El objetivo central es reducir la extracción de recursos naturales que siempre son finitos, bajar la dependencia de las importaciones, generando y potenciando un ciclo donde los materiales y productos se mantienen en uso el mayor tiempo posible, minimizando así la generación de residuos² (Carlos de Miguel, (CEPAL, 2021).

Este concepto reconoce el agua como un recurso finito, lo que implica la disminución y regulación de su uso siempre que sea posible, así como la maximización de su reutilización, con el fin de superar las externalidades negativas generadas por su escasez o bien el deterioro de la calidad. En ese sentido, la economía circular, como modelo de gestión, tiene una gran importancia en la operacionalización de las aguas residuales, por cuanto son múltiples los beneficios que se desprenden de la adopción de este innovador enfoque, en particular, la recuperación del agua, biosólidos, nutrientes y por cierto energía.

Las aguas residuales municipales están compuestas en un 99,8% por agua, lo que implica que, una vez tratadas, pueden ser utilizadas con distintos usos, como el riego agrícola, turismo, paisajístico; en procesos industriales y en reposición de aguas subterráneas, entre otros. Respecto, al uso con fines domésticos, y en especial para la descarga de inodoros, es importante destacar que en el presente ya se cuenta con diversas tecnologías y sistemas que lo permiten (López y otros, 2017).

² C. de Miguel, K. Martínez, M. Pereira y M. Kohout, "Economía circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora", Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/120), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2021.

Por otro lado, es posible extraer nutrientes del tratamiento de las aguas residuales a partir de los lodos derivados del proceso de tratamiento de éstas. Dicho aprovechamiento puede realizarse simplemente vertiendo a los suelos los lodos de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), previo proceso de adecuación, o bien haciendo uso de sanitarios no convencionales que permitan la separación de los fluidos corporales para su aplicación sobre el suelo, o bien con tecnologías de tratamiento de aguas servidas más sofisticadas, que permiten la recuperación del fosfato que contienen mediante la cristalización de estruvita (Mo y Zhang, 2013). Finalmente, respecto a la recuperación de energía derivada del proceso de tratamiento de aguas residuales, que es el interés central de este documento, se muestra que es posible aprovechar los desechos de las PTAR para generar energía en forma de gas.

Esto ocurre al llevar a cabo la digestión anaeróbica (sin oxígeno) de las aguas servidas municipal, en lugar de utilizar un tratamiento aeróbico. También se pueden utilizar los gases generados en la digestión de los lodos tanto en plantas de tratamiento anaeróbicas como aeróbicas. El proceso de digestión anaerobia (sin oxígeno) de las aguas residuales y de los lodos, genera como subproducto gas metano (CH_4). Este gas puede ser aprovechado *in situ* para distintos procesos dentro de la planta de tratamiento, como por ejemplo, calentar el digestor de lodos elevando la eficiencia misma del proceso de digestión anaeróbica, así como para secar y reducir el volumen de los lodos antes de su disposición final (López y otros, 2017). Asimismo, este biogás, puede ser utilizado para generar energía permitiendo ahorros directos al sistema de suministro público o incluso, previa limpieza de impurezas puede ser utilizado directamente como combustible para fines vehiculares, industriales y/o residenciales.

La producción total de metano por unidad de tiempo ($\text{m}^3/\text{día}$ o similar) en una PTAR municipal depende principalmente de la tecnología de tratamiento, además de la concentración y composición de la materia orgánica presente en el agua residual, las que varían de acuerdo con: disponibilidad de agua potable, nivel socioeconómico de la población, infiltración de aguas lluvias en la red de alcantarillado, tipo de instalación sanitaria y actividades desarrolladas en la zona donde se recolectó el agua residual (Von Sperling, 2005). Asimismo, influyen en ello la temperatura del proceso y las características y eficiencia de la tecnología (López y otros, 2017).

Por ejemplo, una PTAR anaeróbica que recibe 100 toneladas de DQO (Demanda Química de Oxígeno) a lo largo del año puede llegar a obtener una producción cercana a los 285 MWh/año con un sistema de aprovechamiento de metano (Hernández, 2021)³. Esta cantidad de energía es equivalente al consumo anual de 158 hogares. Además, esta tecnología presenta la ventaja de disminuir hasta en 6 a 8 ochos veces el volumen de lodos a ser manejados en las instalaciones de tratamiento, con beneficios adicionales por la reducción de costos de tratamiento y de disposición final de biosólidos.

Además, es factible recuperar la energía de los lodos producidos en el tratamiento aerobio de aguas residuales mediante su digestión anaerobia, lo que permite capturar y aprovechar el metano en la generación o cogeneración de energía. Esta técnica puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 21% en las plantas de tratamiento, y puede contribuir con hasta el 14% de la energía necesaria para la planta, lo que se traduce en importantes beneficios ambientales (Aguilar y Blanco, 2018). De hecho, en plantas de tratamiento de aguas residuales de mayor envergadura, como la Biofactoría Mapocho Trebal en Santiago de Chile, el 83% de la energía consumida es renovable y autogenerada a partir del metano recuperado (Aguas Andinas, s.f.).

También se ha documentado que la PTAR Zona Noreste, Villa Hermosa, México, que emplea una tecnología aerobia para el tratamiento de aguas residuales, podría producir volúmenes de biogás cuyo potencial energético representa el 128% de la demanda energética de la planta (Ramírez, Medrano y Escobedo, 2020). De la misma forma, Aguilar y Blanco (2018), rescatan que las PTAR el Ahogado y San Pedro Mártir, que emplean procesos de lodos activados y dual respectivamente, generan hasta el 78%, para el primer caso, y el 68%, en el segundo caso, de la energía eléctrica que requieren para su funcionamiento.

³ Esta información constituye un ejemplo referencial, ya que la eficiencia y producción dependen del tamaño/capacidad de la planta, su localización y otras características antes mencionadas.

Así, considerando que según UNEP (2021) el 20% de las emisiones de metano asociadas a la actividad humana se originan en el sector de residuos, que incluye a la disposición final de residuos sólidos y el tratamiento de aguas residuales; que el metano es un potente contaminante del aire local que contribuye a la formación de ozono, y es después del dióxido de carbono, el gas de efecto invernadero con mayor contribución al cambio climático siendo 28 veces más potente para atrapar calor que el dióxido de carbono en un período de 100 años, 84 veces más potente en un período de 20 años y ha contribuido aproximadamente al 30% del calentamiento global hasta ahora (UNEP, 2021; European Commission, 2023); y que reducir las emisiones de metano en un 45% evitaría 260.000 muertes prematuras, 775.000 visitas al hospital por asma, 73 mil millones de horas de trabajo perdidas debido al calor extremo y 25 millones de toneladas de pérdidas de cultivos al año (UNEP, 2021).

En consecuencia, la adopción de un enfoque de economía circular en el tratamiento de las aguas residuales representa importantes retornos en términos ambientales, económicos y financieros que contribuyen a la sostenibilidad de los sistemas de suministro de agua y saneamiento, así como de las empresas que los operan (Rodríguez y otros, 2020). De esta manera, al aplicar los principios de la economía circular en la gestión de aguas residuales, la recuperación y reutilización de recursos permite generar una transformación en el saneamiento, el que pasa de ser un servicio costoso a uno autosostenible y que ciertamente agrega valor a la economía (Ibid.).

II. Viabilidad económica, ambiental y social del aprovechamiento de metano en PTAR con capacidades menores a 500 l/s: casos de estudio en El Salvador, México y Panamá

Dado que la investigación sobre la viabilidad del aprovechamiento de metano en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) con capacidades superiores a 500 l/s ya está ampliamente documentada (Nolasco, 2010; Silva et al., 2016; Saravia Matus et al., 2022a), y considerando la proliferación generalizada de PTAR con capacidades inferiores a 500 l/s en América Latina y el Caribe —solo en México, Colombia y Perú existen más de 3.161 PTAR que operan a esta escala (Saravia Matus et al., 2022a)—, este capítulo tiene como objetivo evaluar la viabilidad financiera de la recuperación de metano en PTAR con capacidades inferiores a dicho umbral, centrándose especialmente en casos específicos de municipalidades de El Salvador, México y Panamá.

Para llevar a cabo este análisis, se realizó una estimación inicial de las emisiones asociadas a cada proceso de tratamiento en cada PTAR. Se calculó el metano aprovechable y la energía eléctrica posible de generar. Además, se llevó a cabo un examen detallado de la viabilidad financiera, así como de los beneficios ambientales y socioeconómicos que podrían derivarse al aprovechar el metano en la cogeneración de energía en diez PTAR: cuatro en México, tres en El Salvador y tres en Panamá.

Para la selección de estas diez PTAR, se realizó un análisis conjunto con la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados de El Salvador (ANDA), la Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA), la Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA), la Comisión de Agua Potable del Estado de México (CAEM), la Comisión de Agua Potable de Quintana Roo (CAPA) y el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales de Panamá (IDAAN), siguiendo los criterios de selección que se presentan a continuación⁴:

- i) Oportunidad: se priorizaron a las PTAR que contaron con la posibilidad de capturar y utilizar el metano producido como fuente de energía, ya sea para la generación eléctrica, calefacción u otras aplicaciones, con el objetivo de maximizar los beneficios económicos y ambientales.

⁴ Para el caso de México, aunque no se configuró como un requisito para su selección debe señalarse que de las PTAR seleccionadas en México, 3 se encuentran en el Estado de Quintana Roo, una zona estratégica para el país debido a su relevancia en el ámbito turístico a nivel regional y mundial. Por otra parte, la cuarta PTAR se localiza en San Martín de las Pirámides, un municipio del Estado de México con una importancia singular debido a que abarca una parte significativa de la zona arqueológica de Teotihuacán, zona de la imponente Pirámide del Sol.

- ii) Replicabilidad: se buscaron proyectos que sean replicables en diferentes regiones de El Salvador, México, Panamá y otros países de América Latina y el Caribe. Para ello, se seleccionaron PTAR que tuvieran la capacidad de atender a una población de más de 30.000 habitantes (50 l/s) y menos de 200.000 habitantes (300 l/s). Esta diversidad permite evaluar la viabilidad de implementación en diversos contextos geográficos, climáticos y demográficos.
- iii) Interés local: se priorizaron a las PTAR cuyos operadores y gobierno local demostraron disposición y compromiso para desarrollar y mantener el proyecto a corto y mediano plazo. En este sentido la participación de los actores locales resulta fundamental para garantizar el éxito a largo plazo de las instalaciones de aprovechamiento de metano, así como para involucrar a la comunidad y promover la apropiación de la tecnología.

Adicionalmente, se consideraron ubicaciones estratégicas que ayudaron a promover un enfoque sostenible que integre tanto la protección del medio ambiente como el impulso económico y turístico de la región. La sinergia entre el turismo y el aprovechamiento de metano en estas PTAR permitió la creación de oportunidades de promoción internacional en la adopción de prácticas sustentables y la generación de empleo local, mientras se realizaron esfuerzos por proteger la salud humana y ambiental.

A. Metodología empleada en la estimación de emisiones de metano en el tratamiento de aguas residuales

Para realizar la estimación de las emisiones de metano en el proceso de tratamiento de las aguas residuales, se empleó el procedimiento de cálculo propuesto por el IPCC (2006) e IPCC (2019), que depende de la carga orgánica específica que recibe la planta para estimar la cantidad de metano por generada en las PTAR (ver anexos A1, A2 y A3)⁵.

Dicha metodología, permite estimar las emisiones de metano en cada una de las etapas del proceso de tratamiento biológico de las aguas residuales. Estas etapas o fases principales corresponden a: i) etapa de tratamiento secundario de aguas residuales, ya sea anaerobia o aerobia, y ii) fases posteriores de digestión de los lodos generados en el tratamiento primario y secundario de las aguas residuales. En la fase secundaria, las emisiones de metano en una PTAR dependen de dos factores de manera predominante. En principio, de la tecnología empleada en el tratamiento de las aguas residuales, ya que esta determina si la materia orgánica se degrada transformándose en biogás, o en lodos. Y en segunda medida, del adecuado funcionamiento de las instalaciones.

A este respecto, es necesario anotar que las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) que emplean tecnologías anaerobias, ya sea a partir de reactores compactos o de sistemas lagunares, realizan un proceso de degradación de la materia orgánica, transformándola mayoritariamente en biogás con alto contenido de metano (Saravia Matus y otros, 2022a; Saravia Matus y otros, 2023b).

Por otro lado, los sistemas que emplean procesos aerobios, cuando son eficientemente operados, cuentan con niveles muy bajos de generación de metano en sus sistemas de tratamiento de agua, ya que degradan la materia orgánica, transformándola mayoritariamente en lodos. En estos sistemas, las emisiones de metano se presentan, ya no en el tratamiento de las aguas residuales, sino en el tren de lodos⁶ cuando se realiza su digestión anaerobia. Cabe destacar que, si se realiza una estabilización aerobia de los lodos, no habría emisiones importantes de metano.

En las PTAR que constan de tecnologías duales (anaerobia-aerobia), la estimación de las emisiones potenciales de metano debe realizarse por separado, con base en las corrientes o procesos principales, de acuerdo con las recomendaciones del IPCC (2019). Esto implica que, en la primera corriente de tratamiento (proceso anaerobio), la carga de DQO a considerar en la estimación, corresponde a la carga entrante al

⁵ Para profundizar sobre la metodología de trabajo, véase: S. Saravia Matus y otros, "Hoja de ruta técnica y financiera para la recuperación de metano y nutrientes de aguas residuales en América Latina y el Caribe", serie Recursos Naturales y Desarrollo, N° 222 (LC/TS.2024/36), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2024.

⁶ Proceso utilizado en las estaciones depuradoras de aguas residuales.

sistema; mientras en la segunda corriente de tratamiento (proceso aerobio), la carga orgánica a considerar en la estimación corresponde a la diferencia entre la carga de entrada a la PTAR y la carga removida en la etapa de tratamiento anaerobio (primera corriente)⁷.

En el caso de los sistemas que emplean tratamiento secundario aerobio y en los cuales se adicionaría un proceso de digestión anaerobia de lodos, se debe tener presente que para el cálculo de emisiones de la primera corriente (tratamiento aerobio), se emplea la carga de entrada al sistema en DBO/año para la estimación; mientras para la segunda corriente (correspondiente a una futura digestión anaerobia de lodos) se estiman las emisiones a partir de la cantidad de lodo generado en el proceso de tratamiento biológico previo (primera corriente).

B. Potencial del aprovechamiento energético del metano en PTAR seleccionadas en El Salvador, México y Panamá

1. Caracterización general de las PTAR

Las PTAR analizadas a escala territorial corresponden a un total de 10 sistemas: 3 plantas en El Salvador (Ciudad Futura, Departamento de San Salvador; San Juan Opico, Departamento de La Libertad y Metapán Departamento de Santa Ana), 4 plantas en México (Centenario, Bicentenario y San Miguelito en el Estado de Quintana Roo y San Martín de las Pirámides en el Estado de México) y 3 plantas en Panamá (Montijo y Soná en la Provincia de Veraguas y Puerto Armuelles en la Provincia de Chiriquí), (véase mapa 1). El cuadro 1 incluye la ubicación, identificación de la tecnología y resumen de capacidad instalada, caudales tratados y concentración de parámetros de control de carga contaminante a la entrada de cada uno de las 10 PTAR consideradas.

Mapa 1
Localización general de las PTAR en estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por la ANDA y ASA (El Salvador), CAEM, CAPA y CONAGUA (México) y el IDAAN (Panamá).

⁷ Se debe aclarar que para este caso, no sería procedente el cálculo adicional de emisiones por efecto de la recirculación de los lodos generados en la fase aerobia, en el reactor UASB por las siguientes razones: 1) la mayor proporción de lodos aerobios generados en el proceso previo de LAC son recirculados dentro del mismo proceso, pasando del clarificador o sedimentador secundario al reactor biológico de LAC, práctica corriente y necesaria dentro del proceso aerobio para mantener, con ayuda de la aireación, un lodo activo que potencie la eficiencia de remoción de carga orgánica. 2) El exceso de lodo del reactor LAC asociado con procesos de purga podría ser recirculado al reactor UASB, pero este material es en esencia un lodo aerobio que puede afectar la actividad metanogénica de lodo presente en el reactor anaerobio.

Descripción de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) analizadas. Se presenta la descripción de las PTAR en cada país en un contexto territorial que considera la división político-administrativa (provincia, departamento y/o estado, así como las municipalidades involucradas), procesos de tratamiento, aspectos básicos institucionales y de operación.

Cuadro 1
Características generales de las PTAR en estudio

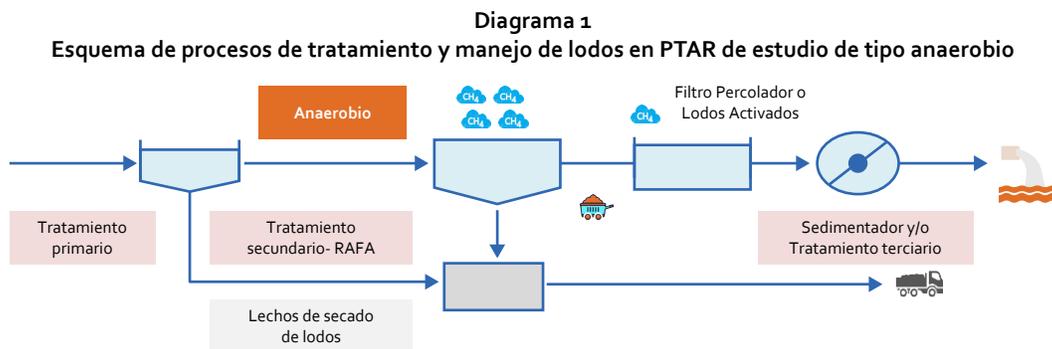
Nombre	Ubicación	Tecnología de Tratamiento	Capacidad instalada (En l/s)	Caudal tratado (En l/s)	Habitantes atendidos	Concentración del afluente		
						DQO (Mg/l)	DBO (Mg/l)	SST (Mg/l)
El Salvador								
San Juan Opico	(Dpto. La Libertad)	Anaerobio (RAFA) + aerobio (FP)	30	25,34	10 040	496,0	198,0	265
Ciudad Futura	(Dpto. San Salvador)	Anaerobio (RAFA) + aerobio (FP)	30	26,04	21 250	780,0	375,0	1 411
Metapán	(Dpto. San Ana)	Anaerobio (RAFA) + Aerobio (FP)	60	50,00	19 830	700,0	312,5	530
México								
San Martín de las Pirámides	Teotihuacan - Edo. México	Anaerobia/ aerobia (RAFA + LAC)	70,0	45,0	30 240	609	251	245
Centenario	Othon P. Blanco - Edo. Quintana Roo	Aerobia (LAC)	180,0	120,0	29 623	539	259	
Bicentenario	Solidaridad - Edo. Quintana Roo	Aerobia (LAC + FP)	120,0	60,0	14 811	944	454	
San Miguelito	Cozumel (Edo. Quintana Roo)	Aerobia (LAC + FP)	220,0	160,0	39 497	832	400	
Panamá								
Montijo	Distrito Montijo- Provincia Veraguas	Anaerobio (RAFA) + aerobio (LAC)	8,4	8,4	2 178	262,2	126,0	
Puerto Armuelles	Distrito de Barú Provincia de Chiriquí	Aerobio (LAC)	64,0	42,5	20 000	475,9	228,8	
Soná	Distrito Montijo- Provincia Veraguas	Aerobio (LAC)	25,0	25,0	12 786	517,1	248,6	

Fuente: El Salvador: Información reportada por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) de El Salvador y la Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA) en taller de capacitación organizado por la CEPAL el 5 de septiembre de 2023 en San Salvador. México: Información reportada por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA) la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM); esto es información de caudal, habitantes atendidos y concentración validada en taller de capacitación organizado por CEPAL en julio de 2023 en Quintana Roo, contó con la asistencia de personal técnico de cada una de las PTAR identificadas en el cuadro. Panamá: Información reportada por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales (IDAAN), se presentaron concentraciones de Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) estimada con base en aporte de 42 g DBO/Hab/día (Rosa, 1998), y de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) con base en factor de 2,08 veces valor de la DBO RAFA + LAC: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente + Lodos Activados Convencionales; LAC: Lodos Activados Convencionales; LAC + FP: Lodos Activados Convencionales + Filtro Percolador.

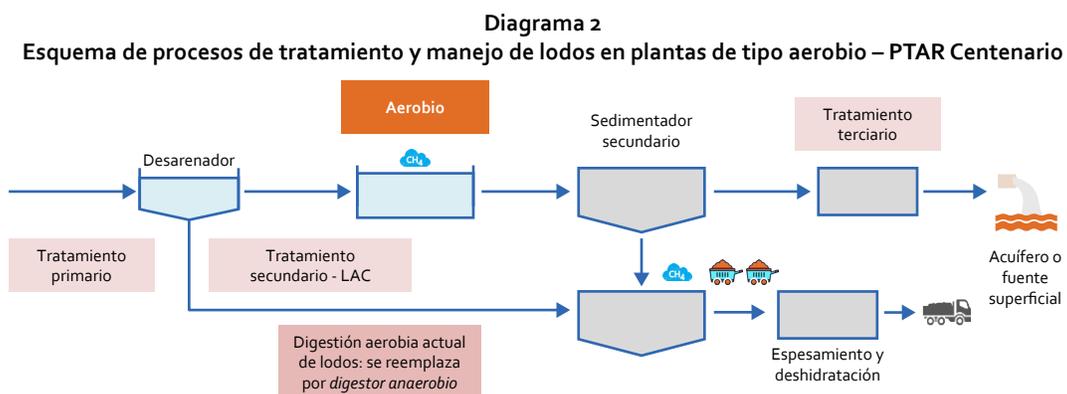
La tecnología empleada en el tratamiento secundario de las aguas residuales del grupo de 10 PTAR estudiadas, corresponde a opciones duales que se presentan de la siguiente manera: i) 5 PTAR que emplean tratamiento biológico secundario con la opción de Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

(RAFA)⁸ (3 PTAR en El Salvador, 1 PTAR en México y 1 PTAR en Panamá), proceso que se complementa con tratamiento aerobio de Filtro Percolador (FP) en el caso de las PTAR en El Salvador (San Juan Opico, Ciudad Futura y Metapán) y con proceso aerobio con Lodos Activados Convencionales (LAC) en el caso de las PTAR de San Martín de las Pirámides en México y de Montijo en Panamá, ii) 5 PTAR con tratamiento biológico secundario de tipo aerobio, que corresponden a las 3 PTAR en el Edo. de Quintana Roo (México), además de 2 PTAR en Panamá (Puerto Armuelles y Soná), todas las cuales emplean la opción de LAC.

El proceso de tratamiento que emplea reactor tipo RAFA en las PTAR analizadas, el cual genera en forma directa metano, consta en términos generales de tres etapas (ver diagrama 1): i) tratamiento preliminar o primario, que consta de rejillas y desarenador (ambos para la retención de sólidos), así como medidor de caudales, ii) tratamiento secundario en dos fases; la primera que consiste en el paso de las aguas residuales por el reactor RAFA, en donde la materia orgánica es degradada con la generación de metano (en el caso de las PTAR de El Salvador los reactores RAFA están descubiertos, caso contrario a la PTAR de San Martín de las Pirámides; la PTAR de Metapán posee tres quemadores de biogás en la fase o tren de aguas del proceso anaerobio de tratamiento) y una segunda fase de tratamiento secundario, en el que las aguas residuales provenientes del reactor RAFA son conducidas⁹ hacia un tratamiento de tipo aerobio con la opción de FP o LAC según aplique, y iii) en la tercera etapa, el agua tratada pasa por un decantador, en donde se separan los lodos que se formaron durante el paso de las aguas residuales por el filtro biológico o LAC, que posteriormente son purgados y dispuestos en patios de secado; mientras las aguas tratadas son conducidas a disposición final.



Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por ANDA, ASA, CAEM e IDAAN.

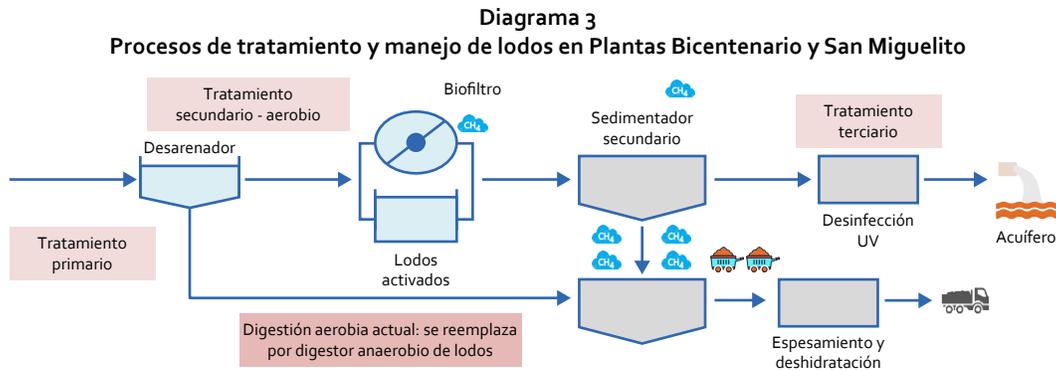


Fuente: Elaboración propia a partir del Informe 2013 de la SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) y la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) que aborda la situación del medio ambiente en México.

⁸ También denominados reactores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).

⁹ En el caso de la PTAR Ciudad de San Juan Opico posee tres sistemas de bombeo. Uno de ellos opera a partir de dos motores de 2hp (caballos de fuerza), para bombear las aguas del reactor RAFA al filtro biológico. Los otros dos sistemas emplean cada uno, un motor de 0,5 hp para el bombeo de lodos desde el reactor RAFA y desde el sedimentador secundario, hasta el patio de secado de lodos.

En términos de capacidad instalada se puede apreciar que las PTAR con mayor capacidad corresponde a las plantas del Estado de Quintana Roo en México de tecnología aerobia (capacidad instalada de entre 120 l/s y 220 l/s) y en un rango medio se tendrían las PTAR con tecnología anaerobia de San Martín de las Pirámides en México y de Metapán en El Salvador, con capacidades de 70 l/s y 60 l/s, respectivamente, además de la PTAR de Puerto Armuelles en Panamá (capacidad instalada de 64 l/s). Finalmente, se tendrían las PTAR con capacidad de 30 l/s o menores, que comprenden las PTAR de San Juan Opico y Ciudad Futura en El Salvador (capacidad de 30 l/s en ambos casos), así como las PTAR de Soná y Montijo en Panamá, con capacidades instaladas de 25 l/s y 8 l/s, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia a partir del Informe 2013 de la SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) y la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) que aborda la situación del medio ambiente en México.

Las PTAR que se encuentran con un menor nivel de utilización respecto de la capacidad instalada corresponden a las plantas de Quintana Roo en México. Con información actualizada del caudal tratado por las PTAR en 2023, presentada por autoridades y técnicos a cargo de la operación de estas plantas en el marco del Taller CEPAL-CONAGUA 2023 se logró establecer que, en promedio, estas PTAR operan al 63% de su capacidad. En esa oportunidad se destacó la baja utilización de la capacidad instalada en la planta de Bicentenario, que solo emplea el 50% de su capacidad, mientras que la planta de San Miguelito este porcentaje corresponde al 73%. Para efectos de los cálculos de emisiones de metano, los valores de concentración de carga orgánica (DQO y DBO, según corresponda) fueron actualizados en el desarrollo del mismo evento, con participación de operadores de estas PTAR.

Los costos asociados con el consumo de energía en las PTAR constituyen información básica para el análisis de opciones de aprovechamiento de metano que permitan disminuir estos costos. Según información recopilada por consultores en ingeniería hidráulica y evaluación de proyectos (s.f.), la PTAR de San Martín de las Pirámides presentaba en 2022 un consumo energético estimado en 844.165 KWh/año, que acapara el 62% de los costos anuales de operación en esta PTAR, que ascienden en total a 3.324.700 de pesos mexicanos (equivalentes alrededor de 170.000 dólares). El mayor consumo se presenta en los equipos de aireación (sopladores). Según información entregada por CAEM en el Taller CEPAL-CONAGUA 2023, el costo de suministro de energía asciende a 0,19 dólares /KWh.

Entre los problemas operativos que se han podido identificar respecto de las PTAR analizadas, se destacan, en El Salvador, inconvenientes de eficiencia en las PTAR de San Juan Opico y Ciudad Futura, incluyendo aspectos electromecánicos por cortes de energía, deterioro o daños en los equipos de bombeo y distribución no uniforme de caudales en el filtro biológico o percolador (ANDA, 2022). En el caso de la PTAR de San Martín de las Pirámides en México, estudios de diagnóstico (Consultores en Ingeniería Hidráulica y Evaluación de Proyectos, Sf), indicaban que se requerían reparaciones del sistema de automatización en las bombas de influente; un mantenimiento general para los sopladores y su instrumentación; el desazolve al cárcamo y purga a los reactores aerobios (LAC); y la dictaminación del estado estructural del reactor anaerobio; lo que requeriría una inversión para rehabilitación y puesta en marcha de 1.800.000 de pesos mexicanos (entre 88.000 dólares y 95.000 dólares). En términos generales, en las PTAR analizadas, no fue posible acceder a información detallada sobre las características y volúmenes de lodos generados en los procesos de tratamiento; y además, se e identifican vacíos en información en el monitoreo de rutinaria, en especial en las PTAR de Panamá.

Recuadro 1 Aspectos operacionales de las PTAR analizadas

Aspectos institucionales y operacionales

Localización PTAR El Salvador

La PTAR "San Juan Opico", es una planta operada por la ANDA, y se encuentra ubicada en el sector Las Playitas del municipio San Juan Opico (departamento La Libertad); cuenta con una capacidad instalada de 30 l/s; un caudal tratado de 25,34 l/s; y sirve un estimado de 10.040 habitantes (ANDA, 2022). Por otro lado, la PTAR "Ciudad Futura", también operada por la ANDA, se encuentra en el municipio de Cuscatancingo, departamento de San Salvador; cuenta con una capacidad instalada de 30 l/s; un caudal tratado de 26,04 l/s; y sirve un estimado de 21.250 habitantes. Finalmente, la PTAR de Metapán, operada por la municipalidad, destaca por ser la más grande en capacidad y de construcción reciente. Con una capacidad instalada de 60 l/s y un caudal medio tratado de 50 l/s, brinda servicios a cerca de 19.830 habitantes (véase cuadro 1).

En estas tres PTAR, la tecnología empleada en el tratamiento secundario está centrada en el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA), el cual se complementa con un proceso aerobio de Filtro Percolador (FP). El proceso consta de tres etapas: tratamiento primario, que consta de rejillas y desarenador (ambos para la retención de sólidos), y medidor de caudales; una etapa de tratamiento secundario en dos fases: la primera fase consiste en el paso de las aguas residuales por el reactor RAFA, en donde la materia orgánica es degradada con generación de metano; en la segunda fase las aguas residuales provenientes del reactor RAFA son bombeadas hacia el FP, donde son tratadas en un entorno aerobio (ANDA, 2022). Posteriormente, en la tercera etapa, el agua tratada pasa por un decantador, en donde se separan los lodos que se formaron en el filtro biológico, que posteriormente son purgados y dispuestos en un patio de secado; mientras las aguas tratadas son conducidas a disposición final (ANDA, 2022).

Mapa 1 Localización PTAR El Salvador



Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por la ANDA y ASA (El Salvador), CAEM, CAPA y CONAGUA (México) y el IDAAN (Panamá).

Localización PTAR México

Tres de estas PTAR están ubicadas en el Estado de Quintana Roo y operan bajo sistemas de tratamiento aerobio, mientras que una de ellas se ubica en el Estado de México y contempla procesos de tratamiento anaerobio. Juntas, estas plantas tienen una capacidad instalada de 590 l/s y tratan cerca de 385 l/s, brindando servicio a aproximadamente 115.000 habitantes.

La PTAR San Martín de las Pirámides fue construida en el 2015, con una inversión de 44.419.220 de pesos mexicanos (equivalente a 2.380.451 de dólares) con recursos del orden federal (60%) y estatal (40%) e inició sus actividades en 2016. Es operada por la CAEM en coordinación con el Organismo Público Descentralizado de Agua Potable, Alcantarillado y saneamiento de Teotihuacan (ODEAPAST); se encuentra ubicada en el municipio de Teotihuacan, Estado de México. Cuenta con capacidad instalada de 70 l/s; caudal tratado de 45 l/s; y una

concentración promedio de DQO (Demanda Química de Oxígeno) de 580 mg/l en el ingreso al sistema, equivalente a una carga cercana a las 823 toneladas de DQO/año. La tecnología empleada es de tipo dual (anaerobia/aerobia) a partir de un sistema RAFA + LAC en un entorno aerobio.

La PTAR Centenario es operada por la CAPA y entró en operación en 1999 en la localidad de Chetumal, municipio de Othón P. Blanco, Estado de Quintana Roo. Cuenta con capacidad instalada de 180 l/s, tratando un caudal promedio de 120 l/s, con concentración media de DBO de 259 mg/l que ingresa al sistema, equivalente a cerca de 980 toneladas de DBO/año. Por su parte, la PTAR Bicentenario, también operada por CAPA, entró en operación en el 2011 en la localidad de Tulum, municipio Solidaridad, Edo. Quintana Roo; cuenta con capacidad instalada de 120 l/s y se adelantan obras de ampliación y adecuación para complementar procesos biológicos de remoción de nutrientes (nitrógeno). El caudal tratado es en promedio de 60 l/s; y se reporta una concentración promedio de 454 mg/l de DBO en el afluente, equivalente a cerca de 859 toneladas por año. La PTAR emplea un tratamiento secundario aerobio dual, a partir de filtro percolador y un reactor de LAC. Finalmente, la PTAR San Miguelito entró en operación en 1980, y fue ampliada en abril del 2012 a una capacidad instalada de 220 l/s. Se encuentra ubicada en la Isla de Cozumel, Estado Quintana Roo, y al igual que las plantas Centenario y Bicentenario, es operada por CAPA. En la actualidad trata un caudal promedio de 160 l/s y en el afluente se registra concentración promedio de 400 miligramos de DBO por litro de agua residual, equivalente a una carga de cerca de 2.018 toneladas por año. El proceso de tratamiento de aguas residuales es similar al de la PTAR Bicentenario.

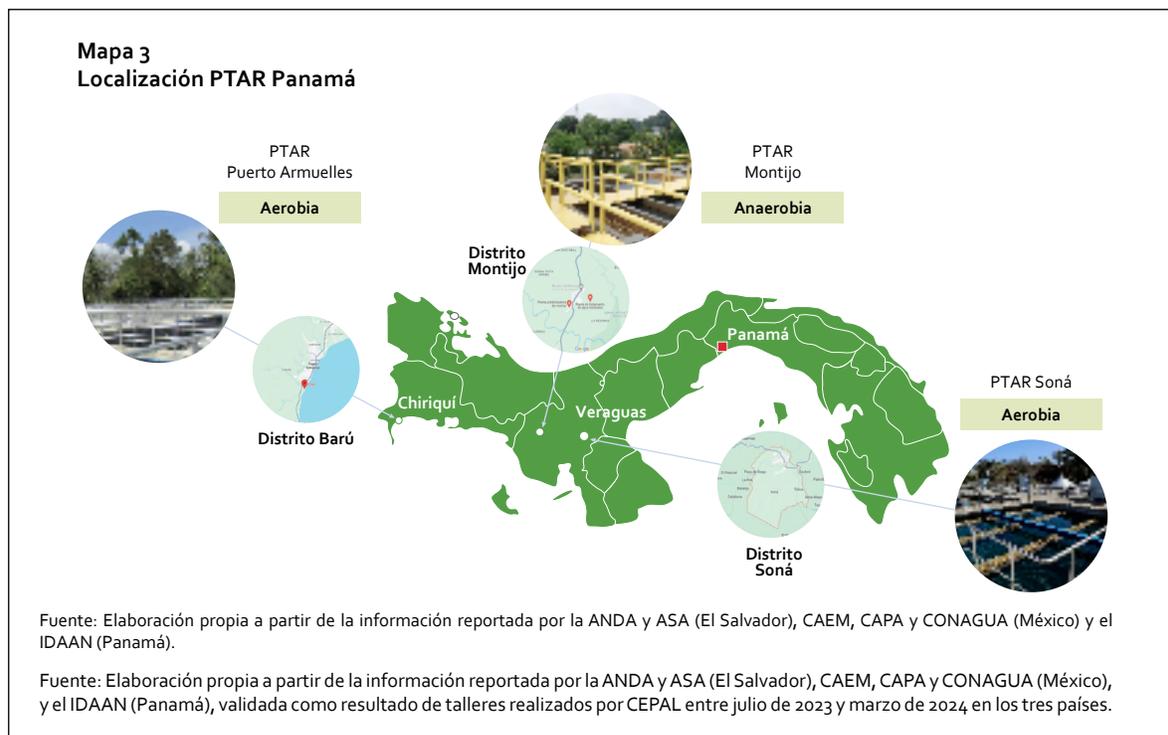
Mapa 2
Localización PTAR en México



Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por la ANDA y ASA (El Salvador), CAEM, CAPA y CONAGUA (México) y el IDAAN (Panamá).

Se seleccionaron para análisis dos PTAR con tratamiento secundario aerobio (Puerto Armuelles y Soná) y una con tratamiento anaerobio (PTAR Montijo).

La PTAR de Montijo tiene una capacidad instalada de 8,4 l/s y atiende a una población estimada de 2.178 habitantes. Utiliza una tecnología de tratamiento dual (anaerobia-aerobia) que consta de un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA) y un sistema de lodos activados convencionales (LAC) en la fase aerobia. La PTAR de Puerto Armuelles tiene una capacidad instalada de 64 l/s, lo que le permite tratar las aguas servidas de aproximadamente 20 mil habitantes, considerando una descarga promedio de 150 litros por habitante al día. Emplea una tecnología de lodos activados convencionales para el tratamiento de las aguas residuales, y, aunque cuenta con infraestructura para la digestión anaerobia de lodos, el IDAAN ha informado que esta no se encuentra en funcionamiento. Adicionalmente, durante el 2021 registró un consumo de energía eléctrica de 92.100 kWh. Finalmente, la PTAR Soná-Paraíso tiene una capacidad instalada de 25 l/s y atiende a una población estimada de 12.786 habitantes. También emplea una tecnología de lodos activados convencionales. Durante el 2021 registró un consumo de energía eléctrica que ascendió a los 204.720 kWh.



2. Metano emitido y aprovechable en la generación de energía eléctrica

A continuación, se presentan las estimaciones de metano emitido y aprovechable en las 10 PTAR consideradas para este estudio. Los cálculos efectuados para cada una de las PTAR aparecen resumidos en los cuadros 2 y cuadro 3. En términos de generación de metano y de las inversiones asociadas con su potencial aprovechamiento, fueron preparadas y validadas en el marco de talleres de capacitación y visitas técnicas, llevado a cabo en el Estado de Quintana Roo (México) en julio de 2023 (coordinación previa con CONAGUA, CAPA y CAEM), para el caso de San Salvador durante la primera semana de septiembre de 2023 (coordinación previa con la Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA) y la ANDA) y finalmente en Panamá en marzo de 2024 en coordinación con el IDAAN.

Cuadro 2
Metano potencialmente emisible y captable en cada fase de tratamiento de las PTAR analizadas

Nombre	Metano generado (En m ³ /año)				Metano captado (En m ³ /año)			
	Anaerobia (RAFA)	Aerobia	Lodos	Total	Anaerobia (RAFA)	Aerobia	Lodos	Total
El Salvador								
San Juan Opico	110 982	486	-	111 468	99 884	-	-	99 884
Ciudad Futura	179 350	563	-	179 898	161 415	-	-	161 415
Metapán	309 053	2 794	-	311 847	278 148	-	-	278 148
Total	599 384	3 842	-	603 227	539 446	-	-	539 446
México								
San Martín de las Pirámides	230 465	629	-	231 094	207 419	-	-	207 419
Centenario	-	5 266	439 102	444 368	-	-	395 192	395 192

Nombre	Metano generado (En m ³ /año)				Metano captado (En m ³ /año)			
	Anaerobia (RAFA)	Aerobia	Lodos	Total	Anaerobia (RAFA)	Aerobia	Lodos	Total
Bicentenario	-	3 920	398 930	402 850	-	-	359 037	359 037
San Miguelito	-	10 845	904 200	915 045	-	-	813 780	813 780
Total	230 465	20 660	1 742 233	1 993 358	217 790	-	1 568 009	1 775 428
Panamá								
Montijo	19 446	132	-	19 577	17 501	-	-	17 501
Puerto Armuelles	-	1 647	137 357	139 004	-	-	123 621	123 621
Soná	-	1 053	87 812	88 865	-	-	79 031	79 031
Total	19 446	2 832	225 169	247 447	17 501	-	202 652	220 153

Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por la ANDA y ASA (El Salvador), CAEM, CAPA y CONAGUA (México), y el IDAAN (Panamá), validada como resultado de talleres realizados por CEPAL entre julio de 2023 y marzo de 2024, en los tres países.

Cuadro 3
Potencial energético de las 10 PTAR analizadas

Nombre	Capacidad instalada (En l/s)	Caudal tratado (En l/s)	Habitantes atendidos	Metano		Contenido energético (MWh/año)	Cogeneración de energía	
				Generado (En m ³ /año)	Recuperable (En m ³ /año)		Eléctrica (MWh/año)	Calórica (MWh/año)
El Salvador								
Ciudad de San Juan Opico	30	25,34	10 040	111 468	99 884	996	349	398
Ciudad Futura	30	26,04	21 250	179 912	161 415	1 609	563	644
Metapán	60	50,00	19 830	311 847	278 148	2 773	971	1 109
Total	120	101,58	51 120	603 227	539 446	5 378	1 882	2 151
México								
San Martín de las Pirámides	70,0	45,0	30 240	231 094	207 419	2 068	724	827
Centenario	180,0	120,0	29 623	444 368	395 192	3 940	1 379	1 576
Bicentenario	120,0	60,0	14 811	402 850	359 037	3 580	1 253	1 432
San Miguelito	220,0	160,0	39 497	915 045	813 780	8 113	2 840	3 245
Total	590,0	385,0	114 171	1 993 358	1 775 428	17 701	6 195	7 080
Panamá								
Montijo	8,4	8,4	2 178	19 577	17 501	174	61	70
Puerto Armuelles	64,0	42,5	20 000	139 004	123 621	1 233	431	493
Soná-Paraíso	25,0	25,0	12 786	88 865	79 031	788	276	315
Total	97,4	75,9	34 964	247 447	220 153	2 195	768	878

Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por la ANDA y ASA (El Salvador), CAEM, CAPA y CONAGUA (México), y el IDAAN (Panamá), validada como resultado de talleres realizados por CEPAL entre julio de 2023 y marzo de 2024, en los tres países.

Estos talleres contaron con la participación de profesionales de las entidades descritas, incluyendo personal técnico con responsabilidad sobre cada una de las PTAR analizadas, lo cual permitió retroalimentar y validar de la mejor manera los cálculos y estimaciones efectuados, generando además un valioso intercambio de información sobre proyectos y actividades bajo responsabilidad de autoridades del sector de agua y saneamiento en El Salvador, México y Panamá¹⁰.

Acorde con la metodología aplicada para la estimación de metano, no todo el metano generado en el proceso es aprovechable. Por ejemplo, en las PTAR con tecnologías duales de tipo aerobio (por ejemplo, las tres PTAR del Estado de Quintana Roo en México), aunque se generan pequeñas emisiones en la fase de tratamiento aerobia; no es posible captar dicho metano. De la misma forma, debido a la existencia de ineficiencias en los sistemas de ruteo y captura del metano, solo es posible aprovechar hasta un 90% del metano generado en la fase anaerobia del tratamiento de aguas residuales.

Una revisión general de los resultados generales, muestran que el mayor potencial de generación de metano y de energía eléctrica generable se presentaría en el grupo de PTAR de México (4 PTAR que generarían cerca de 2 millones de m³ de metano por año, lo que corresponde a más de tres veces el volumen de metano que generarían las tres PTAR de El Salvador y ocho veces la cantidad estimada para las tres PTAR de Panamá). Esta situación guarda relación directa con la mayor capacidad instalada y caudal tratado que reúnen estos sistemas, en especial las 3 PTAR del estado de Quintana Roo. Al considerar exclusivamente las PTAR que contemplan tecnología de tipo anaerobia, se muestra que la PTAR de Metapán en El Salvador, con un caudal medio tratado de 50 l/s, generaría mayor volumen de metano que las PTAR de San Martín de las Pirámides y de Montijo en Panamá, lo cual se explica por las mayores concentraciones de entrada de carga contaminante y caudal en esta PTAR. En términos absolutos, las PTAR con mayor potencial de generación de metano, son las plantas de San Miguelito, Centenario y Bicentenario en Quintana Roo (México), seguidas de la PTAR de Metapán en El Salvador. A continuación, se presenta el análisis de los resultados particulares para cada país.

Generación y aprovechamiento de metano - PTAR en El Salvador. Según los reportes de los exámenes realizados por la ANDA e información validada en el taller CEPAL celebrado con la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) de El Salvador y la Autoridad Salvadoreña del Agua (ASA) en septiembre de 2023, las tres PTAR analizadas presentaron una concentración promedio de entre 496 y 780 miligramos de DQO por litro de agua residual. En cuanto a la carga orgánica, las plantas evaluadas reciben aproximadamente 2.141 toneladas al año en términos de DQO (396 toneladas en San Juan Opico, 641 toneladas en Ciudad Futura y 1.104 toneladas en Metapán). Además, se estima que estas plantas producen alrededor de 603.227 m³ de metano al año, de las cuales el 51,7% corresponden a la planta de Metapán, lo que equivale a cerca de 8.487 toneladas de CO₂ emitidas al año¹¹ (véase cuadro 2). En ese marco, solo se podrá captar un total de 539.446 m³ de metano, con un contenido energético de 5.375 MWh/año. No obstante, tomando en cuenta las eficiencias de los sistemas de cogeneración, solo serían aprovechables 1.841 MWh de energía eléctrica y 2.151 MWh de energía calórica, al año.

Para ejemplificar este potencial, es necesario considerar el caso específico de Ciudad Futura. En esta localidad, el consumo energético de las estaciones de bombeo de agua potable, según ANDA, es de aproximadamente 1.164 MWh al año. Por lo tanto, la generación de energía eléctrica que se deriva del aprovechamiento de metano en esa PTAR permitiría solventar el 48% de la energía requerida para el abastecimiento de agua potable de esa localidad.

Generación y aprovechamiento de metano - PTAR en México. A partir de los parámetros documentados en el cuadro 1, se ha podido estimar que las PTAR San Martín de las Pirámides, Centenario, Bicentenario y San Miguelito, reciben una carga orgánica anual expresada en DBO₅ estimada en

¹⁰ Para acceder a más detalles sobre estos talleres, ver: i) El Salvador: <https://www.cepal.org/es/eventos/cepal-economia-circular-sector-agua-potable-saneamiento-salvador>; ii) México: <https://www.cepal.org/es/eventos/cepal-economia-circular-sector-agua-potable-saneamiento-mexico>, y iii) Panamá: <https://www.cepal.org/es/notas/asistencia-tecnica-aprovechamiento-metano-recuperacion-nutrientes-municipios-seleccionados>.

¹¹ Si se realiza un comparativo, equivale a las emisiones de CO₂ de 2,5 millones de salvadoreños en un día.

823 ton/año, 980 ton/año, 859 ton/año y 2.018 ton/año respectivamente. Esta carga orgánica, al pasar por las diferentes fases de tratamiento de las PTAR y al adicionar unidad de digestión anaerobia de lodos aerobios en las plantas de Centenario, Bicentenario y San Miguelito, generaría emisiones estimadas en 1.993.358 m³ de metano al año, es decir, más de 28.047 toneladas de CO₂ equivalente al año (véase cuadro 2). Como se ha mencionado, no todo el metano generado en el proceso es aprovechable. Por ejemplo, en las PTAR que emplean tecnologías aerobias (de lodos activados, filtros percoladores, o duales) se generan muy pequeñas emisiones en la fase de tratamiento que no es posible captar. En estos casos, solo se puede captar el metano generado a partir de la digestión anaerobia de lodos. En las PTAR que emplean tecnologías anaerobias/aerobias aplica este mismo principio.

De la misma forma, debido a la existencia de ineficiencias en los sistemas de ruteo y captura del metano, solo es posible aprovechar hasta un 90% del metano generado. Esto significa que para el total de las PTAR de México se podrán captar un total de 1.775.428 m³ de metano, con un contenido energético de 17.804 MWh/año, equivalente al consumo de 8.680 habitantes (con un consumo promedio de 2.051 KWh/año). De la misma forma, tomando en cuenta las eficiencias de los sistemas de cogeneración, solo serían aprovechables 6.232 MWh de energía eléctrica y 7.122 MWh de energía calórica, al año (véase cuadro 3).

En el caso específico de San Martín de las Pirámides, dada la tecnología anaerobia/aerobia que emplean para el tratamiento de aguas residuales, se identificó un potencial importante para el aprovechamiento energético del metano, pues allí el consumo energético de la PTAR se ha estimado en 844.165 KWh/año, abarcando un 62% de los costos anuales de operación de la PTAR (Consultores en Ingeniería Hidráulica y Evaluación de Proyectos, s.f.). Por otra parte, si se realizan las transformaciones necesarias para el aprovechamiento energético del metano generado, sería factible proveer el 86% de la energía eléctrica requerida por la planta para ser operada. Esto, sin considerar la posibilidad de aprovechar la energía calórica recuperable para el calentamiento del reactor anaerobio lo cual incrementaría la eficiencia de operación de la PTAR en cuestión.

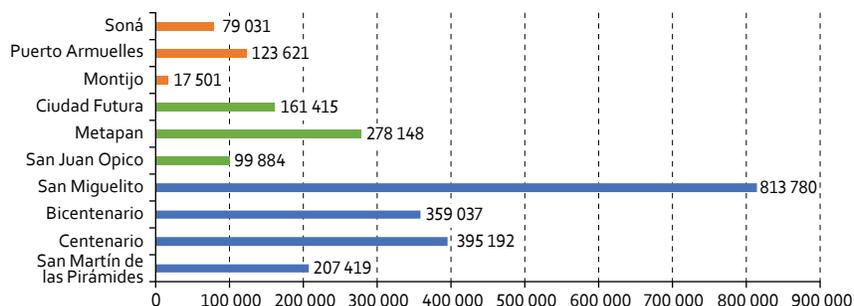
En consecuencia, dado el bajo nivel de utilización que presentan algunas de estas PTAR, vale la pena preguntarse cuál será el nivel de emisiones futuras, cuando esta infraestructura se utilice al 80% de su capacidad. Los cálculos indican que, en el momento en que estas PTAR alcancen ese nivel de utilización, considerando los mismos niveles de concentración de DBO documentados en el cuadro 1, se esperarían emisiones anuales de 2.472.321 m³ de metano, de los cuales 2.201.969 m³ serían aprovechables para generar 7.684 MWh de energía eléctrica y 8.781 MWh de energía calórica (véase cuadro 3).

Generación y aprovechamiento de metano - PTAR en Panamá. A partir de los parámetros señalados más arriba en el Cuadro 1, se ha podido estimar que las PTAR Montijo, Puerto Armuelles y Paraíso, recibirían una carga orgánica anual expresada en DBO₅ estimada en 33 y 196 ton/año respectivamente. Esta carga orgánica, al pasar por las diferentes fases de tratamiento de las PTAR, genera unas emisiones estimadas en 247.447 m³ de metano al año, es decir, más de 3.481,6 toneladas de CO₂ equivalente¹² (véase cuadro 3).

Aplicando la metodología de estimación de metano propuesta en este documento, se concluye que en las tres plantas analizadas es posible recuperar un total de 220.153 m³ de metano con un contenido energético equivalente a 2.195 MWh/año, lo que sería suficiente para abastecer el consumo de energía de cerca de 2.200 habitantes de Panamá al año. Sin embargo, debido a las eficiencias de los sistemas de cogeneración, únicamente se podrían aprovechar 768 MWh de energía eléctrica y 878 MWh de energía calórica al año. Para ilustrar mejor el potencial de esta fuente energética, es conveniente considerar los casos específicos de las PTAR de Puerto Armuelles y Soná-Paraíso. Durante el año 2021, el consumo energético en Puerto Armuelles fue de 92 MWh/año, mientras que en Soná-Paraíso alcanzó los 205 MWh/año. En cuanto a la generación de energía eléctrica potencial, Puerto Armuelles y Soná-Paraíso podría producir hasta 431 MWh/año y 276 MWh/año, lo que significa que serían capaces de cubrir la totalidad de su demanda energética y, además, generar excedentes.

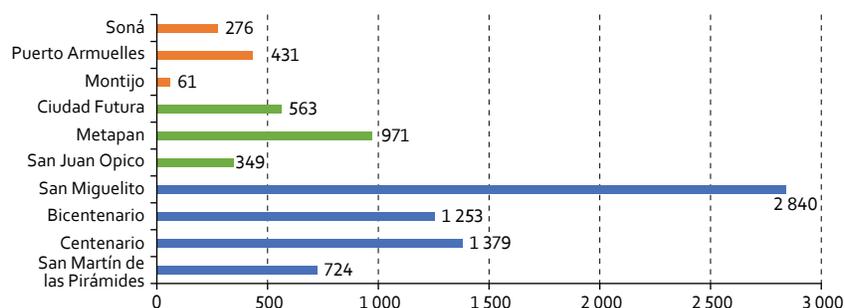
¹² Equivalente a las emisiones de CO₂ de 396 mil panameños en un día, aproximadamente.

Gráfico 1
Resultados de estimación de metano recuperable en las 10 PTAR analizadas
 (En m³/año)



Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por la ANDA y ASA (El Salvador), CAEM, CAPA y CONAGUA (México), y el IDAAN (Panamá), validada como resultado de talleres realizados por CEPAL entre julio de 2023 y marzo de 2024, en los tres países.

Gráfico 2
Resultados de estimación de energía eléctrica generable en las 10 PTAR analizadas
 (En Mwh/año)



Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por la ANDA y ASA (El Salvador), CAEM, CAPA y CONAGUA (México), y el IDAAN (Panamá), validada como resultado de talleres realizados por CEPAL entre julio de 2023 y marzo de 2024, en los tres países.

3. Estimación de los costos de inversión

Con el objeto de calcular los beneficios que le reportaría a la ANDA en El Salvador, a CAEM y CAPA en México y al IDAAN en Panamá, el aprovechamiento del metano generado en el tratamiento de aguas residuales de las 10 PTAR analizadas, es necesario definir los costos de inversión en los que se debe incurrir, para captar el metano generable en estas PTAR y transformarlo en energía (véase cuadro 4).

Cuadro 4
Costos de inversión estimados para el aprovechamiento energético del metano en PTAR seleccionadas de El Salvador
 (En dólares corrientes)

Concepto	San Juan Opico	Ciudad Futura	Metapán ^a	Total
Soplador centrífugo	N/A	N/A	N/A	N/A
Tubería de biogás (se asume tirada máxima de 50 m)	7 500	7 500	1 500	22 500
Antorcha ("flare") (U\$S)	28 400	28 400	N/A	85 200
Gasómetro de biogás	68 100	68 100	68 100	204 300
Desulfurizador	17 400	17 400	17 400	52 200

Concepto	San Juan Opico	Ciudad Futura	Metapán ^a	Total
Sistema de purificación de biogás (demister, deshumidificador)	41 700	41 700	41 700	125 100
Motogenerador a biogás (CHP)	121 121	190 472	266 764	578 357
Cubierta de PEAD Reactor Anaerobio		7 200		7 200
Total	284 221	360 772	395 464	1 040 457

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por la ANDA y ASA.

^a La información de inversiones fue validada por ASA. La PTAR de Metapán cuenta con tres antorchas para quema de biogás.

Cuadro 5
Costos de inversión estimados para el aprovechamiento energético del metano
en PTAR seleccionadas de México
(En dólares corrientes)

Concepto	San Martín de las Pirámides ^a	Centenario	Bicentenario	San Miguelito	Total
Espesador de lodos aerobios	N/A	122 600	137 800	180 800	441 200
Bombeo de lodos (tubería, bomba lodos)	N/A	6 100	6 900	9 000	22 000
Digestor de lodos	N/A	0	0	0	0
Adecuación digestor aerobio de lodos en digestor anaerobio	N/A	342 920	392 320	518 760	1 254 000
Soplador centrífugo	N/A	1 600	1 600	1 600	4 800
Tubería de biogás ^b	9 000	7 500	7 500	7 500	30 000
Antorcha ("flare")	34 080	28 400	28 400	28 400	113 600
Gasómetro de biogás	81 720	68 100	68 100	68 100	272 400
Desulfurizador	20 880	17 400	17 400	17 400	69 600
Sistema de purificación de biogás (demister, deshumidificador)	51 040	41 700	41 700	41 700	166 800
Motogenerador a biogás	309 447	459 974	455 883	699 861	1 925 165
Total	505 167	1 096 294	1 157 603	1 573 121	4 332 185

Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por CAEM, CAPA y CONAGUA.

^a Costos suministrados por CAEM (2023).

^b Se asume tirada máxima de 50 m.

Cuadro 6
Costos de inversión estimados para el aprovechamiento energético del metano
en PTAR seleccionadas de Panamá
(En dólares corrientes)

Concepto	Montijo	Puerto Armuelles	Soná-Paraíso	Total
Espesador de lodos aerobios	N/A	60 200	35 700	95 900
Bombeo de lodos (tubería, bomba lodos)	N/A	3 000	1 800	4 800
Digestor de lodos	N/A	362 400	207 600	570 000
Soplador centrífugo	N/A	1 600	1600	3 200
Tubería de biogás (se asume tirada máxima de 50 m)	7 500	7 500	7 500	22 500
Antorcha ("flare")	28 400	28 400	28 400	85 200
Gasómetro de biogás	68 100	68 100	68 100	204 300

Concepto	Montijo	Puerto Armuelles	Soná-Paraíso	Total
Desulfurizador	17 400	17 400	17 400	52 200
Sistema de purificación de biogás (demister, deshumidificador)	41 700	41 700	41 700	125 100
Motogenerador a biogás (CHP)	17 926	189 929	80 948	288 803
Estación de transformación eléctrica, puesto de conexión a la red	-	-	-	-
Circuito de aprovechamiento energía calórica (p. ej. calentamiento de reactor RAFA o secado de lodos)	-	-	-	-
Total	181 026	780 229	490 748	1 452 003

Fuente: Elaboración propia a partir de información reportada por el IDAAN.

La intervención consiste en la instalación de un sistema de ruteo, almacenamiento y purificación del biogás (filas iniciales del cuadro 5), así como de motogeneradores de energía, y de un circuito de aprovechamiento de agua caliente (aprovechamiento de energía calórica). Finalmente, si la PTAR generara excedentes de energía, debería considerarse la instalación de una estación de transformación eléctrica, para conectarse a la red y comercializar estos excedentes¹³.

En el caso de El Salvador, estas inversiones son relativamente similares para las tres PTAR analizadas, debido a que se trata de sistemas que emplean la misma tecnología de tratamiento con la diferencia de que en el caso de Metapán se presenta una mayor carga orgánica (51,7% del total que ingresa a todas las plantas) por efecto combinado de un mayor caudal y concentración de DQO (Demanda Química de Oxígeno), lo que demanda la instalación de un motogenerador de mayor potencia eléctrica, que es evidentemente más costoso. En resumen, se requiere realizar una inversión cercana a los 1,04 millones de dólares, lo que representa una inversión promedio de 20,4 de dólares por persona atendida en las tres PTAR, y de 193,5 dólares por cada MWh de energía eléctrica generable al año por estas PTAR. Es importante destacar que las diferencias en términos de población atendida y carga orgánica en las aguas residuales influyen en el costo de inversión por persona atendida.

Para el caso de México, en las PTAR aerobias que no tienen sistemas de bombeo y espesamiento de lodos, se requerirá desarrollar una inversión para estos fines¹⁴. De otra parte, teniendo en cuenta que las tres PTAR de Quintana Roo cuentan con digestores aerobios de lodos, se propone la adecuación de estas estructuras para convertirlas en digestores anaerobios, lo cual contempla en esencia, el cerramiento de los tanques para que funcionen bajo condiciones anaerobias y otros ajustes¹⁵. Adicional a lo anterior, deberá incurrirse en la instalación de un sistema de ruteo, almacenamiento y purificación del biogás y un motogenerador de energía¹⁶. En el caso de la planta San Martín de las Pirámides, se requerirán las mismas inversiones, con la única excepción de que no será necesario adecuar un digestor anaerobio de lodos. En resumen, debería realizarse una inversión estimada en 4,33 millones de dólares, correspondiente a 569 de dólares por cada MWh¹⁷ de energía eléctrica generable al año por estas PTAR. Si se considera una vida útil de 20 años, el costo de inversión por cada MWh

¹³ En procedimiento, no se desarrollan estimaciones del costo de inversión asociado a la instalación de un circuito de aprovechamiento de agua caliente (aprovechamiento de energía calórica); y de una estación de transformación eléctrica, para conectarse a la red y comercializar estos excedentes.

¹⁴ Dado que las PTAR Centenario, Bicentenario y San Miguelito —según información reportada por CAPA y CAEM— cuentan con cárcamos de recirculación de lodos y espesadores de lodos en funcionamiento, no habría que incurrir en este desarrollo.

¹⁵ Esta inversión en adecuación correspondería por lo menos un 40% de la inversión que representa la construcción de un reactor anaerobio nuevo.

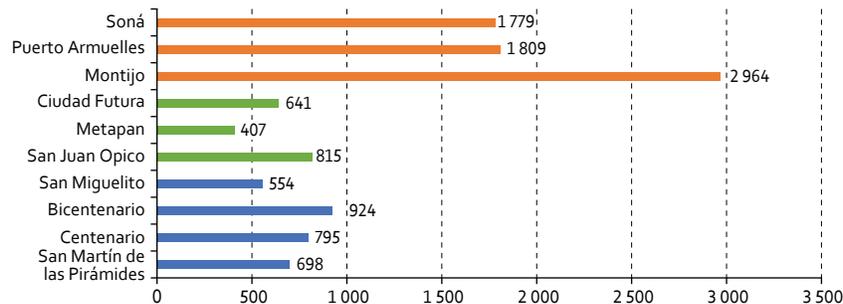
¹⁶ Adicionalmente, podría considerarse la instalación de un circuito de aprovechamiento de la energía calórica producida por el motogenerador, que puede ser empleada para los equipos de aireación del proceso de LAC y/o en el secado de lodos. Además, si la PTAR genera excedentes de energía, se deberá considerar la instalación de una estación de transformación eléctrica para conectarse a la red y comercializar los excedentes.

¹⁷ De acuerdo con IRENA (2021) los costos promedio en el 2020 de generación por fuente corresponden a: energía fotovoltaica: 0,057 USD/kWh; energía eólica terrestre: 0,039 USD/kWh, energía eólica marina: 0,084 USD/kWh y energía geotérmica: ha oscilado entre 0,071 USD/kWh y 0,075 USD/kWh.

generable a lo largo de la vida útil correspondería a 28,2 dólares. La tecnología empleada en el tratamiento de las aguas residuales, así como las diferencias en términos de utilización de la capacidad instalada y de carga orgánica que ingresa al sistema, determina un costo de inversión mayor para las PTAR Bicentenario, Centenario y San Miguelito respectivamente (véase gráfico 3 y gráfico 4).

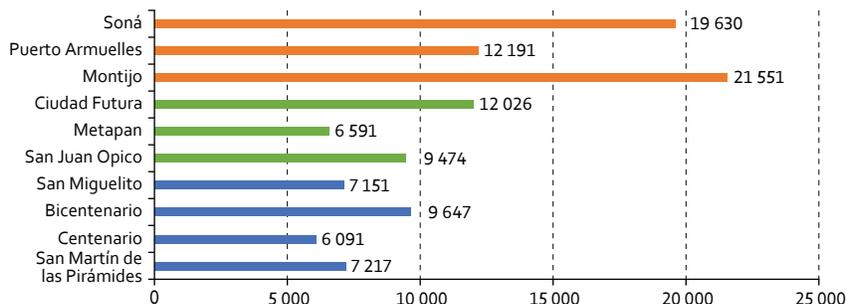
Finalmente, en el caso de Panamá, para las PTAR que utilizan tecnologías de tratamiento aerobio (Soná y Puerto Armuelles), se necesitará realizar inversiones en la instalación de sistemas de bombeo y espesamiento de lodos, así como la construcción de un digestor anaerobio de lodos. Además, será necesario instalar, al igual que en las PTAR de El Salvador y México, un sistema de ruteo, almacenamiento y purificación del biogás, así como adquirir e instalar moto generadores de energía. Cabe destacar que, en el caso de que la PTAR ya cuente con sistemas de bombeo y espesamiento de lodos, esta inversión podría ser omitida. En cuanto a la planta Montijo, que utiliza una tecnología de tratamiento anaerobio, se requerirán las mismas inversiones mencionadas anteriormente, a excepción de la construcción de un sistema de bombeo, espesamiento y digestión anaerobia de lodos. En síntesis, se requiere realizar una inversión cercana a los 1,45 millones de dólares, lo que representa una inversión promedio de 160 dólares por persona atendida en las PTAR, y de 1.890 dólares por cada MWh de energía eléctrica generable al año por estas PTAR. Es importante destacar que las diferencias en términos de población atendida y carga orgánica en las aguas residuales influyen en el costo de inversión (véase gráfico 3 y gráfico 4).

Gráfico 3
Costo de inversión por cada MWh/año de energía eléctrica generable en las 10 PTAR seleccionadas
(En dólares corrientes/MWh)



Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por ANDA y ASA (El Salvador), CAEM, CAPA y CONAGUA (México) y el IDAAN (Panamá) y validada como resultado de talleres realizados por CEPAL entre julio de 2023 y marzo de 2024 en los tres países.

Gráfico 4
Costo de inversión por cada litro de capacidad instalada de las 10 PTAR seleccionadas
(En dólares corrientes por cada litro/segundo de capacidad instalada)



Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por ANDA y ASA (El Salvador), CAEM, CAPA y CONAGUA (México) y el IDAAN (Panamá) y validada como resultado de talleres realizados por CEPAL entre julio de 2023 y marzo de 2024 en los tres países.

4. Beneficios económicos del aprovechamiento del metano

Para la evaluación financiera del proyecto, se parte de un sencillo supuesto: la energía generada en cada PTAR será empleada en la operación de esta PTAR, sustituyendo la energía proveniente de fuentes externas.

Esta sustitución de energía le generará ahorros en la operación de las PTAR, en la medida en que ya no tendrá que destinar cuantiosos recursos para el pago de energía eléctrica. En específico, se evitará un costo de 0,17 dólares /KWh en el caso de El Salvador (que se deriva de la tarifa de energía para el sector industria), según la información validada por expertos de ANDA y ASA, lo cual significaría ahorros anuales superiores a 300 mil dólares (véase cuadro 7). En el caso de México (PTAR Centenario, Bicentenario y San Miguelito) se evitará un costo de 0,167 dólares /KWh, que corresponde a la tarifa de energía para el sector no residencial en México, según la información documentada por Global Petrol Prices (2022). Respecto de San Martín de las Pirámides, de acuerdo con la información reportada por Comisión de Agua Potable del Estado de México (CAEM), dicho costo asciende a 0,19 dólares/KWh. Con los costos de energía indicados anteriormente, se generarían ahorros anuales estimados en 1.049.172 de dólares (véase cuadro 7).

Cuadro 7
Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica en las 10 PTAR seleccionadas
(En dólares corrientes)

Nombre	Caudal tratado (En l/s)	Habitantes atendidos	Inversión Inicial	Inversión Inicial ^a (p.e.)	Ahorro anual	VAN Ahorros (20 años)	TIR (En porcentajes)	B/C	Años para recuperación de inversión
El Salvador									
San Juan Opico	25,34	10 040	284 121	28,3	59 253	504 451	20	1,77	6,90
Ciudad Futura	26,04	21 250	360 772	17,0	95 754	815 204	26	2,26	4,97
Metapán	50,00	19 830	395 464	19,9	145 228	1 236 408	37	3,13	3,44
Total	101,58	51 120	1 040 357	20,4	300 234	2 556 063	29	2,46	4,57
México									
San Martín de las Pirámides	45	30 240	505 167	16,7	135 420	1 152 903	27	2,28	4,92
Centenario	120	29 623	1 096 294	37,0	230 297	1 960 646	21	1,79	6,84
Bicentenario	60	14 811	1 157 603	78,2	209 228	1 781 273	17	1,54	8,65
San Miguelito	160	39 497	1 573 121	39,8	474 228	4 037 366	30	2,57	4,38
Total	385	114 171	4 332 185	37,9	1 049 172	8 392 189	24	2,06	5,69
Panamá									
Montijo	8,4	2 178	181 026	83,1	13 345	114 186	4	0,63	>20 años
Puerto Armuelles	42,5	20 000	780 229	39,0	94 903	807 960	11	1,04	18,7 años
Soná-Paraíso	25,0	12 786	490 748	38,4	60 671	516 529	11	1,05	17,8 años
Total	75,9	34 964	1 452 003	41,5	169 009	1 438 872	7	0,99	>20 años

Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por la ANDA y ASA (El Salvador), CAEM, CAPA y CONAGUA (México) y el IDAAN (Panamá) y validada como resultado de talleres realizados por CEPAL entre julio de 2023 y marzo de 2024 en los tres países.
^a Inversiones por persona equivalente (por habitante atendido).

Evaluación financiera El Salvador. Si se realiza una evaluación financiera, utilizando una tasa de descuento del 10% y un horizonte de 20 años, se podrá identificar que estas inversiones reportan un ingreso estimado de 2,5 millones de dólares, representando un beneficio cercano a 2,5 veces lo invertido y una tasa interna de retorno del 29%. Específicamente, se identificó que el aprovechamiento de metano y la generación de energía eléctrica en la PTAR Metapán presentaría un retorno de 3,1 veces lo invertido y una tasa interna de retorno (TIR) del 37% que permitiría recuperar la inversión en 3,4 años. En la PTAR Ciudad de San Juan Opico, la recuperación de la inversión se alcanzaría cerca del séptimo año; mientras que en Ciudad Futura la recuperación de la inversión se presentaría lograría el año 5, con una TIR del 26%.

Evaluación financiera en México. Con los mismos parámetros aplicados para el caso anterior, se identificó que las inversiones realizadas en el conjunto en las 4 plantas en México, reportan un ingreso estimado a 20 años de 8,39 millones de dólares, representando un beneficio promedio de 2,06 veces lo invertido y una tasa interna de retorno del 24%.

En forma individual, se identificó que el aprovechamiento de metano y la generación de energía eléctrica en la PTAR San Martín de las Pirámides, presentaría un retorno de 2,28 veces lo invertido, equivalente a una TIR del 27% que permitiría recuperar la inversión en cerca de seis años. Del mismo modo, en la PTAR San Miguelito, la de mayor capacidad del conjunto, se estima un retorno de 2,56 veces lo invertido, con una TIR del 30% y 4,4 años de periodo de recuperación de la inversión. En la PTAR Bicentenario, la recuperación de la inversión se presentaría únicamente hasta cerca del año 9, mientras en la PTAR San Miguelito se alcanzaría a recuperar la inversión a mediados del año 4.

Se debe tener en cuenta que esta evaluación financiera, no contempla un incremento en los costos operativos derivados del aprovechamiento energético del metano, por cuanto éstos podrían ser compensados considerando los siguientes factores: i) el empleo de la energía calorica proveniente del proceso de aprovechamiento de metano para el calentamiento tanto de reactores de tratamiento biológico en el tren de aguas como de los digestores anaerobios en el tren de lodos, lo cual puede contribuir a disminuir los costos de suministro de energía para estas etapas de tratamiento, y ii) la generación de lodos en el proceso anaeróbico es de seis a ocho veces menor que la producida en el proceso aeróbico, lo cual disminuye significativamente los costos de tratamiento y disposición final del tren de lodos (Pavlostathis, 2011); este coste puederepresentar hasta el 50% de los costos operativos de una PTAR con tecnología aerobia (Chao y Tianfeng, 2013). A su vez, es necesario resaltar que esta evaluación financiera se ha realizado a partir de un caudal tratado invariable en el tiempo, lo cual se constituye en un supuesto muy fuerte, si se toma en cuenta que el crecimiento urbanístico y el incremento de conexiones a las redes de alcantarillado, necesariamente trae consigo un incremento en los caudales que ingresan a las depuradoras de aguas residuales. A continuación se presentan los resultados alternativos, manteniendo todas las variables contantes y suponiendo un nivel de utilización del 80% de la capacidad instalada de cada PTAR (véase cuadro 8).

Cuadro 8
Potencial energético de las PTAR analizadas en México utilizando el 80% de su capacidad instalada

Nombre	Capacidad instalada (En l/s)	Caudal tratado (En l/s)	Metano		Contenido energético (MWh/año)	Cogeneración de energía	
			Generado (En m ³ /año)	Recuperable (En m ³ /año)		Eléctrica (MWh/año)	Calórica (MWh/año)
San Martín de las Pirámides	70,0	56,0	287 969	258 121	2 573	901	1 029
Centenario	180,0	144,0	533 242	474 230	4 728	1 655	1 891
Bicentenario	120,0	96,0	644 560	574 460	5 727	2 005	2 291
San Miguelito	220,0	176,0	1 006 549	895 158	8 925	3 124	3 570
Total	590,0	472,0	2 472 321	2 201 969	21 954	7 684	8 781

Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por CAPA y CAEM.

Cuadro 9
Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica
en PTAR de México suponiendo un uso del 80% de la capacidad instalada
(En dólares corrientes)

Nombre	Caudal tratado (En l/s)	Habitantes atendidos	Inversión Inicial	Inversión Inicial (p.e) ^a	Ahorro anual	VAN Ahorros (20 años)	TIR (En porcentajes)	B/C	Años para recuperación de inversión
San Martín de las Pirámides	56,0	37 632	505 167	13,4	169 035	1 439 094	33	2,85	3,77
Centenario	144,0	35 547	1 096 294	30,8	276 356	2 352 275	25	2,15	5,47
Bicentenario	96,0	23 698	1 157 603	48,8	334 764	2 850 038	29	2,46	4,56
San Miguelito	176,0	43 447	1 573 121	36,2	521 650	4 441 103	33	2,82	3,81
Total	472,0	140 324	4 332 185	30,9	1 301 806	11 083 010	30	2,56	4,40

Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por CAPA y CAEM.

^a Inversiones por persona equivalente (por habitante atendido).

En este escenario, este grupo de PTAR podría producir un estimado de 7.684 MWh/año de energía eléctrica, a partir de la captación y el aprovechamiento de 2.201.969 m³ de metano al año. Esta generación de energía eléctrica podría generar ahorros globales estimados en 1.301.806 de dólares por año, con ingresos totales descontados a una tasa del 10% durante 20 años de 11.083.010 millones de dólares, que al ser contrastados con el costo de inversión, representarían una relación beneficio costo de 2,56 veces lo invertido.

Se destaca el mayor potencial de la PTAR San Martín de las Pirámides para aprovechar el metano, debido en gran parte por la tecnología utilizada para tratar las aguas residuales, así como de la PTAR San Miguelito, por su mayor tamaño o capacidad de tratamiento. Por otro lado, se destaca en este escenario, la existencia de viabilidad financiera del aprovechamiento del metano en todas las PTAR de Quinta Roo, ya que al utilizar el 80% de su capacidad instalada e incorporando procesos de digestión anaerobia de lodos aerobios, se lograría recuperar el costo de inversión entre los años 3 y 6. Finalmente, si se realizara una agregación de proyectos, de acuerdo con el operador de las plantas, se podrá identificar que CAPA y CAEM percibirían unos beneficios globales, superiores a los costos de inversión en los que se debe incurrir.

Evaluación financiera en Panamá. Con el aprovechamiento de metano, se evitaría un costo de 0,22 dólares/KWh, que corresponde a la tarifa de energía pagada por el IDAAN, en las instalaciones de tratamiento de agua residual. Es decir, en conjunto se generarían ahorros anuales estimados en 169.009 dólares (véase cuadro 7). Al realizar una evaluación financiera (tasa de descuento del 10%¹⁸ y un horizonte de 20 años), se evidencia que las inversiones en la adecuación de las PTAR Puerto Armuelles y Soná-Paraíso podrían recuperarse en aproximadamente 19 y 18 años respectivamente, reflejando una TIR cercana al 11%. En contraste, la PTAR Montijo presenta una TIR del 4% y una relación beneficio/costo de 0,63, indicando que el retorno de inversión no se lograría en dicho período. Aunque la PTAR Montijo genera metano directamente a través del reactor RAFA-UASB (por sus siglas en inglés (Upflow anaerobic sludge blanket digestion) y requiere menores inversiones que las PTAR aerobias, como las de Puerto Armuelles y Soná-Paraíso, este resultado se debe principalmente a su reducido tamaño (menor de 10 l/s).

Al igual que en el caso de las PTAR de México, la evaluación financiera no considera el incremento en los costos operativos derivados del aprovechamiento energético del metano, teniendo en cuenta que los mismos podrían ser compensados por el aprovechamiento de la energía calórica generada y por un menor volumen de lodo. En consecuencia, se presentan resultados alternativos, manteniendo

¹⁸ Tasa empleada por el Banco Mundial, el Banco Interamericano de Desarrollo, Banco Asiático de Desarrollo, y por países como Canadá y México, para la evaluación de proyectos (Castillo & Zhangallimbay, 2021).

todas las variables contantes y suponiendo un nivel de utilización del 80% de la capacidad instalada para la PTAR Puerto Armuelles, la de mayor capacidad del grupo de plantas analizadas en Panamá (véase cuadro 10). En este escenario, la PTAR de Puerto Armuelles podría producir un estimado de 518 MWh/año de energía eléctrica (20% superior a la generación estimada con el caudal actual de operación), a partir de la captación y el aprovechamiento de 148.345 m³ de metano al año. Esta generación de energía eléctrica podría generar ahorros globales estimados en 133.883 de dólares por año, con ingresos totales descontados a una tasa del 10% durante 20 años de 969.552 de dólares, que, al ser contrastados con el costo de inversión, representarían una relación beneficio costo de 1,24 veces lo invertido, mejorando además el valor de la TIR (13%) y reduciendo el periodo de recuperación de la inversión (12,5 años).

Cuadro 10
Evaluación financiera del aprovechamiento de metano en la generación de energía eléctrica suponiendo un uso del 80% de la capacidad instalada en la PTAR Puerto Armuelles
(En dólares corrientes)

Nombre	Caudal tratado (En l/s)	Habitantes atendidos	Inversión Inicial	Inversión Inicial (p.e) ^a	Ingresos anuales	VAN Ingresos (20 años)	TIR (En porcentajes)	B/C	Años para recuperación de inversión
Puerto Armuelles	51,2	24 000	780 229	32,5	113 883	969 552	13	1,24	12,5

Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por el IDAAN.

^aInversiones por persona equivalente (por habitante atendido).

5. Beneficios ambientales del aprovechamiento del metano

El tratamiento de las aguas residuales es una medida eficaz para mitigar la contaminación causada por la descarga de aguas servidas en fuentes no contaminadas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el propio proceso de tratamiento contribuye a la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Esto ocurre tanto por la generación de metano debido a la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaerobias, como por la contaminación indirecta del consumo energético para el funcionamiento de los reactores aerobios (Noyola, Morgan-Sagastume y Güereca, 2013). Por lo tanto, aprovechar el metano generado en las PTAR tiene múltiples beneficios, entre ellos la reducción de las emisiones de GEI, gracias a la disminución de las emisiones de metano; así como por la sustitución de las energías provenientes de fuentes convencionales por energías renovables, como el biogás, que se obtiene de fuentes no convencionales (Nolasco, 2010).

Para estimar el impacto ambiental de los proyectos propuestos en este documento, se utiliza, para las 10 PTAR, un parámetro de consumo de energía eléctrica de 32 KWh/hab./año (Nolasco, 2010) y el factor de emisión del sistema eléctrico nacional en cada país. También debe considerarse que actualmente, las PTAR generan emisiones de biogás en la fase de tratamiento anaerobio (caso 3 PTAR de El Salvador, PTAR San Martín de las Pirámides y PTAR Montijo). Las PTAR Metapán y San Martín de las Pirámides queman el metano generado, pero las PTAR Ciudad Futura y San Juan Opico liberan el metano a la atmósfera.

Reducción de emisiones PTAR El Salvador. Para realizar los cálculos se adoptó el valor del factor de emisión del sistema eléctrico nacional de El Salvador de 0,68 tCO₂e/MWh en el año 2022. En cuanto a la estimación de emisiones en el escenario que contempla la implementación del proyecto, se consideran dos efectos. El primero implica la reducción de emisiones producto de la captación y aprovechamiento de los volúmenes de metano que antes eran emitidos, mediante una Técnica de Energía Alternativa (TEA) en la PTAR de Metapán y de manera libre en las plantas de San Juan de Opico, Ciudad Futura, San Martín de las Pirámides y Montijo. El segundo efecto corresponde a la reducción de la demanda de energía eléctrica debido a la generación interna a partir del aprovechamiento del metano.

Los resultados presentados en el cuadro 12 indican que la implementación de los proyectos podría potencialmente reducir las emisiones en aproximadamente 4.810 toneladas de CO₂ equivalente por año en el caso de El Salvador. Es importante destacar que estos resultados están limitados por la disponibilidad de información. Es probable que, al considerar los beneficios del aprovechamiento de la energía calórica; la reducción estimada de emisiones sea mayor.

Reducción de emisiones-PTAR México. A pesar de las limitaciones de información para estimar el impacto ambiental de los proyectos propuestos en este documento, es factible utilizar, en el caso de San Martín de las Pirámides, el consumo energético registrado por Consultores en Ingeniería Hidráulica y Evaluación de Proyectos (s.f.) de 844,165 kWh/año como punto de partida. A partir de este consumo y considerando un factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional de 0,435 tCO₂e/MWh en el año 2022¹⁹, es posible obtener las emisiones asociadas al consumo de energía de esta PTAR. Además, considerando que el metano emitido por esta PTAR (véase cuadro 3) no se aprovecha actualmente y se quema antes de su emisión, se pueden sumar estos dos componentes para obtener las emisiones totales en el escenario base (las emisiones de CO₂ asociadas con la quema de biogás se determinan con base en un factor de 2,75 Kg CO₂eq/Kg CH₄ quemado).

En el caso de las demás PTAR, dado que no se dispone de información sobre su nivel de consumo energético actual y considerando que son sistemas aerobios que utilizan tecnologías LAC, se emplea el parámetro de consumo de energía de 32 kWh/hab./año mencionado previamente. Así, tomando en cuenta que estas PTAR realizan una digestión aerobia de lodos en su escenario actual, solo se deben considerar las emisiones asociadas al tratamiento de aguas residuales en condiciones aerobias, para la estimación de emisiones en el escenario base. En cuanto a la estimación de emisiones en el escenario que contempla la implementación del proyecto, se consideran los mismos dos efectos planteados para el caso de El Salvador.

Cuadro 11
Reducción de emisiones en las 10 PTAR de estudio
(En toneladas de CO₂ equivalentes al año)

Nombre	Escenario base (1)			Escenario de proyecto (2)			Reducción emisiones (2 - 1)
	Consumo energético	Emisiones metano	Emisiones totales	Consumo energía generada	Emisiones metano	Emisiones totales	
El Salvador							
Ciudad de San Juan Opico	218	1 568	1 787	0	163	163	-1 623,8
Ciudad Futura	462	2 531	2 994	79	260	340	-2 654,1
Metapán	432	575	1 006	0	474	474	-531,9
Total	1 112	8 457	5 787	79	897	977	-4 809,9
México							
San Martín de las Pirámides	367	426	793	52	333	385	-407,6
Centenario	412	74	486	0	692	692	205,5
Bicentenario	206	55	261	0	616	616	355,1
San Miguelito	550	153	702	0	1 425	1 425	722,4
Total	1 536	3 533	2 243	52	3 066	3 119	875,4

¹⁹ Publicado por la Comisión Reguladora de Energía de México: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/806468/4_Aviso_FE_2022__1_.pdf.

Nombre	Escenario base (1)			Escenario de proyecto (2)			Reducción emisiones (2 - 1)
	Consumo energético	Emisiones metano	Emisiones totales	Consumo energía generada	Emisiones metano	Emisiones totales	
Panamá							
Montijo	23	275	299	3	29	32	-267
Puerto Armuelles	31	23	54	0	216	216	162
Soná-Paraíso	69	15	84	0	138	138	55
Total	123	313	437	3	384	387	-50

Fuente: Elaboración propia a partir de la información reportada por la ANDA y ASA (El Salvador), CAEM, CAPA y CONAGUA (México) y el IDAAN (Panamá).

En el contexto de las PTAR que utilizan tecnologías aerobias con digestión aerobia de lodos en su escenario base, se debe tener en cuenta una particularidad al considerar la reducción de emisiones de metano y la implementación de un sistema de digestión anaerobia de lodos. A pesar de que la instalación de un digestor anaerobio de lodos genera un aumento en las emisiones de metano, la introducción de un sistema de captación y aprovechamiento de este permite capturar aproximadamente el 90% de este gas para su utilización como energía eléctrica. Sin embargo, una pequeña cantidad de metano se emitirá a la atmósfera debido a las posibles ineficiencias en los sistemas de captación y enrutamiento del gas. Si se suma este metano a las emisiones generadas durante la fase de tratamiento de aguas residuales, que se consideran marginales, se observará un incremento en las emisiones totales.

En el caso de tecnologías anaerobias de tratamiento de aguas residuales que incorporan el proceso de aprovechamiento del biogás generado, se presenta un balance positivo por la reducción significativa de las emisiones de metano de los reactores o unidades anaerobias (aproximadamente del 51%; véase PTAR San Martín de las Pirámides, cuadro 11). Así, el resultado final dependerá del grado en que se logre sustituir la energía del sistema eléctrico nacional por la energía generada internamente en la PTAR y la diferencia en las emisiones de metano en el escenario base y en el escenario con la implementación del proyecto.

Los resultados presentados, indican que la implementación de los proyectos podría potencialmente reducir las emisiones en aproximadamente 407,6 toneladas de CO₂ equivalente por año. Sin embargo, en las PTAR Centenario, Bicentenario y San Miguelito se observa un incremento en las emisiones debido a que la energía aprovechada no logra compensar completamente el efecto del aumento en las emisiones derivado de las posibles ineficiencias en los sistemas de captación, enrutamiento y almacenamiento del metano. Estos resultados están limitados por la disponibilidad de información. Es probable que, al considerar los beneficios del aprovechamiento de la energía calórica, así como los factores de emisión adicionales asociados, con el transporte y disposición final de los grandes volúmenes de lodos derivados de la digestión aerobia de lodos en las PTAR Centenario, Bicentenario y San Miguelito, la reducción estimada de emisiones sea mayor.

Reducción de emisiones PTAR Panamá. A pesar de las limitaciones de información para estimar el impacto ambiental de los proyectos propuestos en este documento, es factible utilizar, en el caso de las PTAR Puerto Armuelles y Soná-Paraíso, el consumo energético registrado por el IDAAN para 2021 como punto de partida. A partir de este consumo y considerando un factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional de 0,3363 tCO₂e/MWh²⁰, es posible obtener las emisiones asociadas al consumo de energía de estas PTAR. Además, dado que se trata de procesos aerobios de tratamiento, en su escenario actual solo se deben considerar las emisiones asociadas al tratamiento de aguas residuales en condiciones aerobias

²⁰ Factor de emisión de la red eléctrica de Panamá: https://www.ensa.com.pa/sites/default/files/fieldable-panels-panes/ensa_simple_info/files/inventario_de_emisiones_de_gases_2017.pdf.

para la estimación de emisiones en el escenario base. En el caso de tecnologías anaerobias de tratamiento de aguas residuales (PTAR Montijo), que incorporan el proceso de aprovechamiento del biogás generado, se presenta un balance positivo por la reducción significativa de las emisiones de metano de los reactores o unidades anaerobias (aproximadamente del 89%).

Los resultados presentados en el cuadro 11 muestran que la implementación de los proyectos de recuperación de metano podría reducir las emisiones en aproximadamente 50 toneladas de CO₂ equivalente por año. Sin embargo, en las PTAR Puerto Armuelles y Soná-Paraíso se observa un incremento en las emisiones debido a que la energía aprovechada no logra compensar completamente el efecto del aumento en las emisiones derivado de las posibles ineficiencias en los sistemas de captación, enrutamiento y almacenamiento del metano. Es probable que, al considerar los beneficios del aprovechamiento de la energía calórica, así como los factores de emisión adicionales asociados, por ejemplo, al transporte y disposición final de los volúmenes de lodos derivados de la digestión aerobia de lodos en las PTAR Puerto Armuelles y Soná-Paraíso, los resultados en cuanto a la reducción de emisiones sean positivos.

III. Conclusiones

A nivel internacional se ha considerado que el abatimiento del CH₄ (un gas de efecto invernadero (GIV) con potencial de calentamiento global entre 28 y 84 veces superior al CO₂) es la estrategia más rápida y rentable para mantener objetivo de limitar el calentamiento global a 1,5°C y al mismo tiempo apoyar los medios de vida de miles de millones de personas (Banco Mundial, 2023), (Climate & Clear Air Coalition-UNEP, 2021). A su vez, la implementación de los principios de la Economía Circular en diversas actividades productivas se ha demostrado como un enfoque altamente beneficioso en términos ambientales, sociales y económicos. Su idoneidad como marco conceptual, deriva de la capacidad para aprovechar recursos que, anteriormente eran considerados desechos y que a menudo implicaban costos adicionales para la sociedad al requerir una disposición adecuada.

En el sector del agua y saneamiento, se ha evidenciado que la adopción de este enfoque en el tratamiento de aguas residuales es rentable en plantas con capacidades superiores a los 500 l/s; sin embargo, poco se ha dicho sobre las posibilidades que existen para plantas de menor capacidad. Este documento aporta evidencia en ese sentido, al probar la viabilidad financiera que tiene el aprovechamiento energético del metano en diez PTAR en El Salvador (3), México (4) y Panamá (3), todas con capacidades inferiores a 500 l/s. Los resultados indican que la inversión de 6,82 millones de dólares permitiría generar 8.846 MWh/año de energía eléctrica, con ahorros anuales de 1,52 millones de dólares. Estos ahorros permitirían recuperar la inversión en un plazo de 4,49 años sin considerar una tasa de descuento; y en 6,5 años, descontando los ahorros a una tasa del 10%.

El potencial de desarrollo de este tipo de soluciones en PTAR como Metapán en El Salvador es notable, con una recuperación de costos en menos de 4 años. También se destacan los casos de Ciudad Futura en El Salvador, San Martín de las Pirámides en México y San Miguelito en Panamá, con recuperaciones antes del quinto año. La viabilidad de estas iniciativas podría aumentar con el incremento del caudal tratado debido al desarrollo urbanístico, el crecimiento poblacional y las mejoras en la eficiencia de los procesos de tratamiento biológico.

Desde una perspectiva ambiental, se observa una reducción notable en las emisiones de CO₂ equivalente, a saber: 4.810 toneladas en El Salvador, 407,6 en México y 207 en Panamá. Sin embargo, algunos proyectos, como Centenario y San Miguelito, muestran un aumento en las emisiones netas. Este incremento se debe a la falta de datos precisos sobre el consumo energético real, niveles subóptimos

de operación y emisiones no contabilizadas asociadas con la digestión aerobia de lodos. En las PTAR que utilizan digestión aerobia, se genera de 6 a 8 veces más lodo que con la digestión anaerobia, lo que implica procesos adicionales de transporte y disposición final. La ausencia de información sobre estas emisiones adicionales en el escenario base contribuye al balance negativo observado en estas plantas.

Finalmente, aunque este documento no incluye los ingresos derivados de la venta de bonos de carbono en la evaluación de la viabilidad financiera de los proyectos, es importante señalar que la reducción de emisiones mencionada podría generar ingresos anuales de entre 10.849 dólares y 54.246 dólares, si se valora el carbono entre 2 dólares y 10 dólares por tonelada. Esto representaría entre el 0,71% y el 3,57% de los ahorros anuales generados por la producción de energía eléctrica en las PTAR analizadas.

La contundencia de estas cifras permite enriquecer el debate actual sobre el precio del carbono a nivel mundial y otros temas asociados, ya que, por ejemplo, establecer un precio adecuado para el carbono es fundamental para incentivar la reducción gradual de emisiones. Subestimarlos, por el contrario, genera señales confusas que pueden dificultar el logro de los objetivos globales de reducción de emisiones. Lo anterior, resulta problemático si se considera que actualmente, el 75% de las emisiones globales tienen un precio inferior a 10 dólares por tonelada (Banco Mundial, 2017), una cifra que contrasta significativamente con el costo social del carbono estimado en 25,83 dólares por tonelada para América Latina y el Caribe (Alatorre et al., 2019) y en 77 dólares a 124 dólares por tonelada para 2030 y 2050, respectivamente (Stern, Stiglitz, Karlsson y Taylor, 2022).

Recomendaciones

Para adoptar estas iniciativas, es crucial aumentar tanto la inversión pública como privada en el sector. Además, acorde con las recomendaciones de Salazar & Llinás (2024), la transformación productiva en América Latina y el Caribe (ALC) debe enfocarse en actividades y procesos que fomenten el aprendizaje y la innovación, lo que requiere fortalecer el capital humano encargado de la gestión del sector.

En consecuencia, a pesar que el sector enfrenta restricciones significativas para acceder al financiamiento, existen procedimientos para obtener recursos de fondos multilaterales para el financiamiento climático. Estos fondos, como el Fondo Verde del Clima (GCF, por sus siglas en inglés) y el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF, por sus siglas en inglés) priorizan iniciativas con gran impacto en la reducción de emisiones y beneficios económicos, sociales y de salud. Por lo tanto, se recomienda formular proyectos que abarquen varias PTAR (en vez de proyectos individuales), ya sea a nivel nacional, subnacional o incluso regional en Centroamérica y el Caribe, para hacerlos elegibles.

A su vez, debe anotarse que existen experiencias exitosas a partir de la implementación de fondos revolventes a nivel nacional, donde gobiernos y la banca multilateral financian proyectos mediante una autoridad autónoma que administra el fondo y otorga financiamiento adaptado a las necesidades del sector y priorizando la financiación de proyectos, en función del impacto de éstos. Estos fondos tienen la ventaja de ser sostenibles en el tiempo y generan un efecto multiplicador que, en el futuro, dota al sector de más recursos para el desarrollo de inversiones.

Por lo tanto, para acceder al financiamiento, los países deben seguir cuatro etapas clave en el desarrollo de proyectos de recuperación de metano: i) identificar el potencial de aprovechamiento de metano en las PTAR para cumplir con objetivos globales y nacionales de mitigación; ii) alinear con las prioridades y políticas nacionales de reducción de emisiones de GEI; iii) analizar la solidez económica y financiera de los proyectos; y iv) evaluar la rentabilidad y apalancamiento con cofinanciación local y considerando el acceso a fondos internacionales, elaborando planes de financiamiento y estudios de viabilidad económica.

Por otro lado, para fortalecer no solo la inversión, sino también las capacidades de los agentes del sector para implementar iniciativas como las propuestas en este documento, es crucial desarrollar lo que

Salazar J. (2023) denomina capacidades TOPP. Estas capacidades abarcan aspectos técnicos, operativos, políticos y prospectivos de las instituciones, y son fundamentales para que las políticas públicas sean efectivas en la transformación de las realidades del sector.

Mientras las capacidades técnicas y operativas abarcan la planificación, formulación y evaluación de políticas a mediano y largo plazo, así como la coordinación efectiva entre instituciones públicas y privadas; las capacidades políticas se enfocan en la gestión del diálogo social, el desarrollo de liderazgos públicos y la coordinación entre distintos niveles de gobierno y las capacidades prospectivas incluyen la anticipación de megatendencias, la construcción de escenarios futuros y la respuesta rápida a crisis (Salazar J., 2023).

Un sector con mayores capacidades institucionales, técnicas y operativas no solo permitirá implementar una gestión circular del agua en América Latina y el Caribe, sino también superar barreras en la ejecución de proyectos que contribuyan al cumplimiento del ODS 6. Para fortalecer estas capacidades, la CEPAL ha desarrollado jornadas de capacitación para autoridades y operadores de las PTAR en El Salvador, México y Panamá. Estas capacitaciones incluyen herramientas para evaluar el potencial de generación de metano y la viabilidad económica de los proyectos. Además, se ha desarrollado un modelo metodológico para determinar el potencial de metano según las condiciones y tecnologías de operación de los sistemas de tratamiento. Este modelo está disponible para que las autoridades lo utilicen y mejoren la valoración de los beneficios ambientales y económicos, así como la reducción de costos asociados con el manejo y disposición final de biosólidos.

Bibliografía

- Aguas Andinas. (s.f.). *Aguas Andinas*. Obtenido de Aguas Andinas: <https://sustentabilidad.aguasandinas.cl/econom%C3%ADa-circular>.
- Aguilar, I., & Blanco, P. (2018). Recuperación de metano y reducción de emisiones en PTAR Nuevo Laredo, Tamaulipas, México. *Revista de Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(2), 86–114. doi:<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-04>.
- Alatorre, J., Caballero, K., Ferrer, J., & Galindo, L. (2019). *El costo social del carbono: una visión agregada desde América Latina*. CEPAL, Estudios del cambio climático en América Latina.
- ANDA. (2022). *PTAR San Juan Opico, La Libertad*. San Salvador, El Salvador: Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
- Banco Mundial. (2017). *Fijación del precio del carbono*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/results/2017/12/01/carbon-pricing>.
- CAPA. (2022). *Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Comisión de Agua Potable y Alcantarillado, Estado Quintana Roo.
- Chao, L., & Tianfeng, W. (2013). Comparison of sludge digestion under aerobic and anaerobic conditions with a focus on the degradation of proteins at mesophilic temperature. *Bioresource technology*, 140, 131-137. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852413007049>.
- Cleverson, V., V. S., & Fernandes, F. (2007). *Sludge Treatment and Disposal*. London: IWA Publishing.
- Climate & Clear Air Coalition-UNEP. (2021). *GLOBAL METHANE ASSESSMENT - Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions*. Obtenido de Climate & Clear Air Coalition: https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources//2021_Global-Methane_Assessment_full_o.pdf.
- Consultores en Ingeniería Hidráulica y Evaluación de Proyectos. (Sf). *Diagnóstico de plantas de tratamiento de aguas residuales y potabilizadoras municipales para 125 municipios: San Martín de las Pirámides*.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition*. Cowes, Reino Unido: Ellen MacArthur Foundation. Obtenido de <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>.
- European Commission. (2023). *Methane emissions*. European Commission. Obtenido de https://energy.ec.europa.eu/topics/oil-gas-and-coal/methane-emissions_en.
- GlobalPetrolPrices. (2022). *El Salvador precios de la electricidad [Conjunto de datos]*. Obtenido de https://es.globalpetrolprices.com/El-Salvador/electricity_prices/.
- Hernández, A. (2021). *Recuperación de metano en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*. Reunión técnica Economía Circular, CEPAL.

- Intergubernamental Panel on Climate Change. (2006). Tratamiento y eliminación de aguas residuales. En IPCC, *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (págs. 6.1, 6.31).
- Intergubernamental Panel on Climate Change. (2019). *Tratamiento y eliminación de aguas residuales. En IPCC, 2019 Refinamiento a las directrices del IPCC de 2006 para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*. IPCC. Obtenido de https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/5_Volume5/19R_V5_6_Cho6_Wastewater.pdf.
- IPN, (2013). *PTAR Centenario Bicentenario y San Miguelito, Resumen ejecutivo*. Instituto Politecnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo.
- López, J., Ramírez, B., Gomes, C., & Morgan-Sagastume, J. (2017). *Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México, Ciudad de México. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/265430/Guia_lodos_2017.pdf.
- Mejía, L., & Delgado, M. (2020). *Impacto macroeconómico y social de la inversión en infraestructura en Colombia, 2021-2030*. Bogotá, Colombia: FEDESARROLLO. Obtenido de https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/3960/Repor_Mayo_2020_Mej%c3%ada_y_Delgado.pdf?sequence=4&isAllowed=y.
- Mo, W., & Zhang, Q. (2013). Energy–nutrients–water nexus: Integrated resource recovery in municipal wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 127.
- Mulder, N., & Albaladejo, M. (2020). El comercio internacional y la economía circular en América Latina y el Caribe. *Comercio Internacional, CEPAL*, 159. Obtenido de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46618/1/S2000783_es.pdf.
- Nolasco, D. A. (2010). *Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales*. BID.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J., & Güereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. Guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Pavlostathis, S. G. (2011). Kinetics and Modeling of Anaerobic Treatment and Biotransformation Processes. *Comprehensive Biotechnology*, 6, 336-348. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444640468003645>.
- Ramírez, T., Medrano, O., & Escobedo, L. (2020). Generación de energía en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). El caso de la PTAR zona noreste, Villahermosa, México. *EnerLAC*, 4(1), 12-30.
- Rodríguez, D., Serrano, H., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020). *From Waste to Resource: Shifting Paradigms for Smarter Wastewater Interventions in Latin America and the Caribbean*. Washington, DC, United States: World Bank. Obtenido de <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/wastewater-initiative>.
- Rosa, C. (1998). *Metodología para la evaluación aproximada de la carga contaminante*. La Habana: Centro de Información, Gestión y Educación Ambiental (CIGEA).
- Salazar, J. (2023). Repensar, reimaginar, transformar: los “qué” y los “cómo” para avanzar hacia un modelo de desarrollo más productivo, inclusivo y sostenible. *Revista de la CEPAL*, 2023(141), 11 - 43.
- Salazar, J., & Llinás, M. (2024). Hacia la transformación de la estrategia de crecimiento y desarrollo de América Latina y el Caribe: el papel de las políticas de desarrollo productivo. *Revista de la CEPAL*, 141, 57 - 92.
- Saravia Matus, S., Fernández, D., Montañez, A., López, S., Naranjo, L., & Llavona, A. (2023a). Necesidades de inversión en agua potable y saneamiento en América Latina y el Caribe: Efectos en empleo verde y valor agregado bruto. *Serie Recursos Naturales y Desarrollo* (218).
- Saravia Matus, S., Fernández, S., Montañez, A., Gil, M., Blanco, E., Llavona, A., Sarmanto, N. (2023b). From wastewater to renewable energy production: Opportunities and challenges in mid-sized cities in Latin America and the Caribbean. *Natural Resources Forum*, 47 (4), 789-816.
- Saravia Matus, S., Gil, M., Fernández, D., Montañez, A., Blanco, E., Naranjo, L., Sarmanto, N. (2022a). *Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Serie Recursos Naturales y Desarrollo, N° 213 (LC/TS.2022/193).
- Saravia Matus, S., Gil, M., Sarmanto, N., Blanco, E., Llavona, A., & Naranjo, L. (2022b). *Brechas, desafíos y oportunidades en materia de agua y género en América Latina y el Caribe*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

- Silva, I., Mambeli, R., & Tiago, G. (2016). Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment Plants in Brazil: An assessment of feasibility and potential. *Journal of Cleaner Production*, 126, 504 – 514.
- Stern, N., Stiglitz, J., Karlsson, K., & Taylor, C. (2022). *A Social Cost of Carbon Consistent with a Net-Zero Climate Goal*. Roosevelt Institute.
- UNEP. (2021). *Global Methane Assessment*. United Nations Environment Programme.
- Von Sperling, M. (2005). *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Belo Horizonte, Brasil: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Obtenido de <https://www.worldcat.org/title/principios-do-tratamento-biologico-de-aguas-residuarias/oclc/77543218>.

Anexos

Anexo A1

Estimación de las emisiones de metano en fase secundaria de tratamiento de aguas residuales

En esta sección se explica el método usado para estimar el volumen de metano emisible (y captable) en el tratamiento secundario de las aguas residuales, a partir de la metodología propuesta por el IPCC (2019):

$$CH_4 = (TOW - S) * EF \quad (1)$$

$$S = S_{mass} * K_{rem} \quad (2)$$

$$EF = B_0 * MCF \quad (3)$$

$$GA = CH_4 (1 - L) \quad (4)$$

Donde:

- CH₄:** Cantidad de metano generado por el tratamiento aerobio o anaerobio (kg/año)²¹.
- TOW:** Carga orgánica de DQO específica que recibe el sistema anaerobio (kg/año) o de DBO (Kg/año) que recibe el sistema aerobio.
- S:** Componente orgánico removido de las aguas residuales en forma de lodo (kg DQO/año, o, Kg DBO/año).
- EF:** Factor de emisión de metano (kg CH₄/kg DQO, o, kg CH₄/kg DBO).
- S_{mass}:** Cantidad de lodo removido en el proceso de tratamiento secundario, ya sea aerobio o anaerobio (Kg/año). Para estimar este valor, se parte de la carga orgánica que ingresa al sistema, y se multiplica por un factor de generación de lodos. De acuerdo con Cleverson, von Sperling y Fernandes (2007) para sistemas anaerobios, este factor varía entre 0,12 a 0,18 Kg SS/Kg DQO aplicada (se recomienda adoptar 0,15). En sistemas aerobios dependerá de la tecnología, por ejemplo, en Lodos Activados Convencionales y en plantas que operan con biofiltros aireados sumergidos se adopta valor de producción de sólidos de 0,6 a 0,8 Kg SST/Kg DQO aplicada; mientras en filtros percoladores, se considera que la producción de lodo es en promedio de 0,55 a 0,75 kg SST/kg DQO.
- K_{rem}:** Factor de lodo²² (kg DBO/kg de masa de lodo seco)²³. Acorde con los valores de referencia contenidos en la Tabla 6.6A de las metodologías del IPCC (2019), cuando se trata de lodos provenientes de un tratamiento anaerobio, se recomienda adoptar el valor default de 0,8 kg DBO/Kg de masa de lodo seco; en el caso de lodos provenientes de un tratamiento aerobio a los cuales se adiciona un proceso de digestión anaerobia de lodos, se recomienda adoptar como valor default 1 kg DBO/Kg de masa de lodo seco.
- B₀:** Capacidad máxima de producción de CH₄. De acuerdo con IPCC (2019) este parámetro equivale a 0,6 (kg CH₄/kg DBO), o 0,25 (kg CH₄/kg DQO).
- MCF:** Factor corrector para el metano (fracción o porcentaje). Es una indicación de la medida o grado en que cada sistema es anaerobio y, por tanto, varía en función del sistema de

²¹ Para expresar el metano en volumen (m³) se procede a dividir por el valor de la densidad del gas (se recomienda adoptar valor estándar de 0,67 kg/m³).

²² Cantidad de materia orgánica contenida en el lodo.

²³ Puede multiplicarse por un factor de 2,08 si se quiere realizar la estimación en función de la DQO.

tratamiento. Por ejemplo, en reactores cerrados perfectamente anaeróbicos, como el caso de reactores UASB, su valor es de 1. En lagunas anaerobias se recomienda valor de 0,8 (IPCC, 2019). Para los sistemas aerobios, si bien el IPCC (2006) establecía un factor de cero para sistemas aerobios compactos, dicho parámetro fue corregido en las metodologías actualizadas del IPCC (2019), donde se ha determinado que es posible que existan emisiones de CH₄ en algunas fases de tratamiento en sistemas aerobios (por ejemplo, en los estanques de sedimentación), por lo que han determinado un rango entre de 0,003 a 0,09²⁴.

GA: Cantidad de metano (CH₄) aprovechable (m³).

L: Fracción del biogás que se pierde en el sistema de captura, ruteo y reutilización (es decir, metano no captado). 0,1 es un valor estándar para reactores RAFA y digestores anaerobios de lodos. Cuando se capta el metano, ya sea para quemarlo en antorcha o para aprovechamiento energético, una fracción del biogás se pierde en el sistema de captura, ruteo y reutilización. Por lo tanto, la diferencia entre el metano generado y el metano captado será el metano emitido a la atmósfera.

²⁴ En el caso de procesos aerobios, se adopta el valor adoptado es de 0,03.

Anexo A2

Estimación de las emisiones de metano a partir de digestión anaerobia de lodos aerobios

En esta sección se incluye la fórmula recomendada por el IPCC (2019) para el cálculo de las emisiones en procesos de digestión anaerobia de lodos, la cual está incluida en la Tabla 4.1, Capítulo 4 del Volumen 5 de las Metodologías del IPCC. El metano generado en la estabilización de lodos aerobios en un biodigestor anaerobio se presenta de la forma:

$$CH_4 = M * EF \quad (5)$$

Donde:

- CH₄*: Cantidad de metano generado por el tratamiento anaerobio (kg/año)²⁵.
- M*: Masa de residuos orgánicos tratados por el tratamiento biológico. Se asume como la cantidad de SST (lodo) generado por el proceso de tratamiento biológico previo, expresada en Kg. Este valor corresponde al parámetro *S_{mass}* presentado en la ecuación .
- EF*: Factor de emisión de metano (g CH₄/kg de lodo tratado). Se adoptan valores aplicados por López y otros, (2017) de producción teórica de biogás de 0,8 m³/Kg SV, equivalente a 0,56 m³/kg ST (375 g de CH₄/Kg de lodo).

En este caso, también debe aplicarse la ecuación 4 para estimar el metano aprovechable.

²⁵ Para expresar el metano en volumen (m³) se procede a dividir por el valor de la densidad del gas (se recomienda adoptar valor estándar de 0,67 kg/m³).

Anexo A3

Estimación del potencial energético del metano y de la energía eléctrica generable

Una vez determinados los volúmenes de metano emitidos y aprovechables, en cada etapa (tratamiento secundario y digestión de lodos), es posible estimar el contenido energético de este metano.

La energía eléctrica generable kWh/año y la energía calórica recuperable asociada a la generación eléctrica (cogeneración) (kWh/año) se estima con base en estas ecuaciones:

$$CEM = GA * PCI \quad (6)$$

$$GE_e = CEM * ESG_e \quad (7)$$

$$GE_c = CEM * ESG_c \quad (8)$$

Donde:

CEM: Contenido energético del metano captado (kWh/año).

GA: Cantidad de metano (CH₄) aprovechable (m³).

PCI: Poder calorífico del metano. Valor típico: 9,97 (kWh/año).

GE_e: Energía eléctrica generable (kWh/año).

GE_c: Energía calórica generable (kWh/año).

ESG_e: Eficiencia del sistema generador de energía eléctrica. Se presume un 35% de eficiencia promedio de generación eléctrica²⁶.

ESG_c: Eficiencia del sistema de recuperación de calor. Se presume un 40% de eficiencia promedio de recuperación de calor (enfriamiento del motor y de los gases de escape)²⁷.

²⁶ Puede variar entre 20% y 45% según la tecnología y el tamaño del motogenerador.

²⁷ Puede variar entre 30% y 50% según la tecnología y el tamaño del motogenerador.



NACIONES UNIDAS

Serie

C E P A L

Recursos Naturales y Desarrollo

Números publicados

Un listado completo así como los archivos pdf están disponibles en
www.cepal.org/publicaciones

226. Aprovechamiento energético del metano en el tratamiento de aguas residuales: casos de estudio en El Salvador, México y Panamá, Silvia Saravia Matus, Diego Fernández, Pedro Chavarro, Alfredo Montañez y Natalia Sarmanto (LC/TS.2024/143), 2024.
225. Bioeconomía para la diversificación productiva y la agregación de valor: biorrefinerías de residuos en cadenas agroindustriales en el Ecuador”, Lourdes M. Orejuela-Escobar y Adrián G. Rodríguez (LC/TS.2024/130), 2024.
224. Incentivos y oportunidades en el marco regulatorio para el aprovechamiento energético del biogás producido en plantas de tratamiento de aguas residuales en países seleccionados de América Latina y el Caribe, Silvia Saravia Matus, Jordi de la Hoz, Diego Fernández, Alba Llavona, Helena Martín, Alfredo Montañez, Lisbeth Naranjo y Natalia Sarmanto (LC/TS.2024/39), 2024.
223. Perspectivas de desarrollo de las cadenas de valor relacionadas con el litio en Chile y América del Sur, Mario Castillo, Ingrid Garcés y Rodrigo Furtado Messias (LC/TS.2024/38), 2024.
222. Hoja de ruta técnica y financiera para la recuperación de metano y nutrientes de aguas residuales en América Latina y el Caribe, Silvia Saravia Matus, Diego Fernández, Antonio Santos, Pedro Chavarro, Alfredo Montañez y Natalia Sarmanto (LC/TS.2024/36), 2024.
221. Oportunidades para la adopción del enfoque de cadenas de valor en el ámbito de los recursos hídricos, Elisa Blanco (LC/TS.2023/201), 2024.
220. Recursos naturales y desarrollo sostenible. Propuestas teóricas en el contexto de América Latina y el Caribe, Jeannette Sánchez y Mauricio León (LC/TS.2023/198), 2023.
219. Cuentas satélite de bioeconomía para 13 países de América Latina y el Caribe: metodología y resultados, Renato Vargas, Andrés Mondaini y Adrián G. Rodríguez (LC/TS.2023/138), 2023.
218. Necesidades de inversión en agua potable y saneamiento en América Latina y el Caribe: efectos en el empleo verde y el valor agregado bruto, Silvia Saravia Matus, Diego Fernández, Alfredo Montañez, Santiago López, Lisbeth Naranjo y Alba Llavona (LC/TS.2023/101), 2023.
217. Diagnóstico de la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento en El Salvador, México y Panamá, Silvia Saravia Matus, Alfredo Montañez, Diego Fernández y Natalia Sarmanto (LC/TS.2023/96), 2023.

RECURSOS NATURALES Y DESARROLLO

Números publicados:

- 226 Aprovechamiento energético del metano en el tratamiento de aguas residuales
Casos de estudio en El Salvador, México y Panamá
Silvia Saravia Matus, Diego Fernández, Pedro Chavarro, Alfredo Montañez y Natalia Sarmanto
- 225 Bioeconomía para la diversificación productiva y la agregación de valor
Biorrefinerías de residuos en cadenas agroindustriales en el Ecuador
Lourdes M. Orejuela-Escobar y Adrián G. Rodríguez
- 224 Incentivos y oportunidades en el marco regulatorio para el aprovechamiento energético del biogás producido en plantas de tratamiento de aguas residuales en países seleccionados de América Latina y el Caribe
Silvia Saravia Matus, Jordi de la Hoz, Diego Fernández, Alba Llavona, Helena Martín, Alfredo Montañez, Lisbeth Naranjo y Natalia Sarmanto
- 223 Perspectivas de desarrollo de las cadenas de valor relacionadas con el litio en Chile y América del Sur
Mario Castillo, Ingrid Garcés y Rodrigo Furtado Messias